第２章　都市用超小型自動車に適するシリーズハイブリッド動力システムの検討

2.1　緒　言

前章で述べたように、わが国における自家用乗用車の保有台数、走行キロ数は年々著しい伸びを示しており、また車両の大型化が進んでいる。特に都市部においては、自動車の集中による大気汚染や騒音等の問題が深刻化し、また頻発する渋滞が排出ガス、燃費の更なる悪化を招いている。それにもかかわらず、都市内を走行する乗用車の多くは１人か２人しか乗っておらず、エネルギ消費や環境負荷、また空間利用の点からも極めて非合理的であるといえる[(1)(2)]。しかし公共交通機関が発達した都市部においても、ドア・ツー・ドアの自由な個別移動手段への需要が少なからず存在することも否定できない。このような状況に対して、近年、都市内の通勤や用務、買い物等の短距離用途に超小型で省エネルギ、低公害の新しいタイプの自動車（以下、「コミュータカー」という）を導入することが国内外で検討されている[(1)(2)(3)(4)(5)]。図 2.1 に、このようなコミュータカーのイメージを示す[(3)]。現行の軽乗用車より一回り小さい全長 2.5m、定員２名程度のサイズを想定し、都市内走行に必要十分な動力性能と、小型乗用車と同等の衝突安全性を担保することを前提とする。

図 2.1　コミュータカーのイメージ[(1)]

本章では、まず東京都内で乗用車の通勤モニタ走行を行い、そのデータの解析結果により都市内移動における走行距離や発進・停止の頻度等を把握した。その調査結果から、コミュータカーに適する動力方式としてシリーズハイブリッド方式に着目し、概念の異なる二つのタイプの模擬的なコミュータカーを台上運転装置上に設定した。そして、モニタ調査データから抽出した各種の都市内パターンに従った加減速運転を行って、都市内走行に必要十分な性能と省エネルギを両立させるために、電動機と減速機構の組み合せや発電機による給電の最適化について

検討した。さらに、実験で設定したシリーズハイブリッド動力システムの搭載燃料から車両駆動に至るエネルギ効率を算定し、さらに、それを搭載したコミュータカーの一次エネルギ消費量の推定を試みた。

2.2 都市内走行実態の調査

2.2.1 調査方法

コミュータカーの主な用途の一つとしては、都市域における短距離の通勤が考えられる。そこで実験に先立って通勤走行に関するデータを得るために、実車を用いた路上走行調査を行った。この調査にあたっては、排気量 2,000cc のガソリン機関と自動変速機を搭載した乗用車を測定車両とし、著者が所属する旧運輸省交通安全公害研究所（現・独立行政法人交通安全環境研究所）の職員の中から７名の被験者を募って、出勤・退勤の際に、各自の自宅と当研究所との間の運転経路を１往復ずつ走行することを依頼した。これら７つの経路は、都区内または多摩地区の各方面に散在する被験者の自宅と、調布市内に位置する当研究所とを起終点とするもので、四車線の幹線道路から生活道路までを含んだ一般道路であり、高速道路の走行は皆無である。被験者の選定に当たっては、まず自家用車を保有して日常的に運転する者を対象とし、通勤経路や距離が異なるとともに、自宅の立地も都心部、郊外新興住宅地、大規模住宅団地等の様々な形態を含めるよう考慮した。本章では、通勤の片道１回の運転を「１行程」と定義した。

図 2.2 は測定車両の車速データ採取システムの構成、表 2.1 は測定器の諸元を示す。車両の推進軸に反射マーカを貼り、その近傍の床下にフォトダイオードを応用した光電センサを取り付けて、走行中の推進軸の回転速度を１回転１パルスの信号として非接触で検出した。それをＦ－Ｖ変換器でアナログ変換し、減速比と駆動輪外径から車速に換算し、車内に表示すると同時に、搭載したデータロガの内部メモリ上に 0.1 秒間隔のバイナリデータとして記録した。なおこのような方法では車速の計測精度はタイヤ空気圧の過不足等による駆動輪外径の変化に左右されるため、路上走行前に調査車両をシャシダイナモメータ上で試運転することにより、車速の計測値が真値と一致することを確認した。

本調査で使用するデータロガは、狭い乗用車内の助手席への搭載や運転席からの操作・視認が容易であること、また夜間運転時の測定にも使用可能であることが必要条件であるため、外寸 320㎜×320㎜×80㎜、質量 5.5kgという小型・軽量設計でありデータ表示部に大型ＬＣＤを採用した機種を選定した[6]。運転中に内部メモリに記録したデータは、１行程の測定終了直後にデータロガ内蔵のフロッピィディスクへ書き込むこととしたが、これは走行中に

フロッピィディスクへの書き込みを行うと車両の振動による悪影響が懸念されるためである。

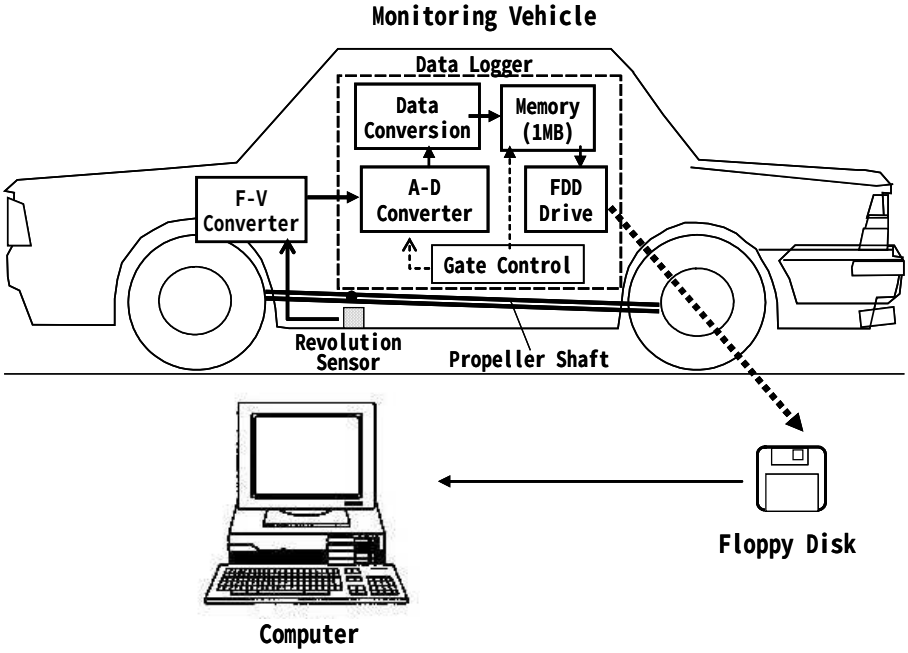


図 2.2　通勤走行調査車両の車速データ採取システム

表 2.1　通勤走行調査車両の車速データ採取に使用した測定器の諸元

Item		Specification
Drive Shaft Revolution Speed Sensor	Type	Phpto Electoronic
	Sensing Method	Diffusion Reflection
	Detective Distance	20cm
	Signal Output	NPN Transistor Open Collector
Data Logger	Size	320mm×320mm×80mm
	Mass	5.5kg
	Data Input	Analog:16ch Digital:8 points Pulse:4 points
	Internal Memory	Data Capacity 416kW
	Floppy Disk	Data Capacity 610kW
	Display	LCD 60 letters ×12 lines

これらの測定器の電源としては車内のシガーライタソケット（直流 12V）を利用し、測定中はスタータモータを作動させることができないため、機関を停止しないよう留意した。各々の行程の起終点における測定開始時および測定終了時の操作は被験者が行うこととした。

フロッピィディスクに収録された 0.1 秒間隔の車速データ（原データ）は、測定終了後にデータロガから抜き出し、パーソナルコンピュータでＢＡＳＩＣプログラムによる演算処理

を行って解析した。解析対象とする車速データは、原データのノイズ等による変動を除去するため、３点ずつの移動平均値を採った 0.1 秒間隔のデータとした。走行中と停車中を判別する車速のしきい値は誤差を考慮して 2km/h とし、それによって全運転時間における走行時間と停車時間を求めた。また走行距離は車速の積算値、加速度・減速度は１秒間の車速変化量として計算した。さらに、車両の駆動輪が路面に対して行う仕事率および仕事量（以下、「走行仕事率」および「走行仕事量」という。）は、下記の式 2-1～2-7 によって算出した。

2.2.2　調査結果と考察

図 2.3 は、各行程の走行距離と運転時間の調査結果を、経路別、往復別に示す。１行程の走行距離は概ね 10～20km であり、最も長い行程の走行距離は約 30km である。したがって通勤による１日当たりの走行距離は概ね 50km/h 以下であると推定される。また各行程における信号待ち等の停車時間が全運転時間に占める比率（以後、「停車時間率」という。）は 20～30%程度であり、中には渋滞が著しいため停車時間率が 50%以上の行程もある。そのため停車中のアイドリングで消費される燃料も相当量にのぼると考えられる。また同一経路でも往路と復路で運転時間が大きく異なる場合があるが、これは運転した時間帯の違いにより自動車交通流の状態が違うためと考えられる。

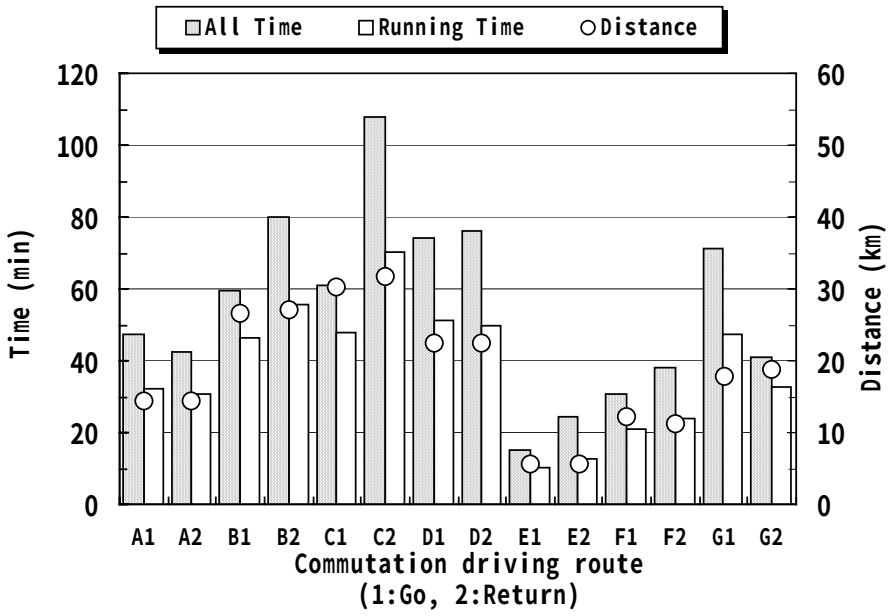


図 2.3　都市内通勤運転の時間と距離（Ａ～Ｇは経路を示す）

これらの行程は、図 2.4 に例示するようなショートトリップ（停車状態から発進し、加減速を経て停止に至る最小の走行単位、以下「トリップ」という。）の集合として構成される(7)

。交通量が多く、また交通信号機や渋滞等により発進・停止の頻度が高い都市内走行においては、加減速性能が特に重要である。そこで個々のトリップ毎に、図 2.4 に示すような発進加速直後に一気に到達する車速の極大値（以下「初期到達車速」という）と、その後の加減速を含めたトリップ中の最高車速を調べた。その出現頻度を図 2.5 に示す。初期到達車速は20㎞/h以下のトリップと 40～50㎞/hのトリップが最も多く、それぞれ全トリップ数の 25%弱を占めている。また最高車速は 40～50㎞/hのトリップが最も多く、30～40 ㎞/hのトリップがこれに次ぐ。したがって本章の調査データからは、コミュータカーの加速性能としては、最高車速 70㎞/h、初期到達車速 50㎞/h程度の走行に十分対応できることが最低限必要であると推定される。

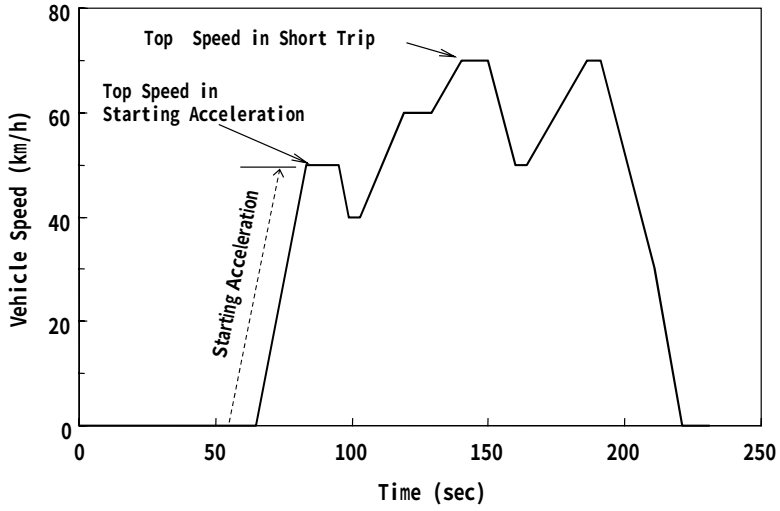


図 2.4　ショートトリップの例と、その初期到達速度および最高運転速度（15 モード）

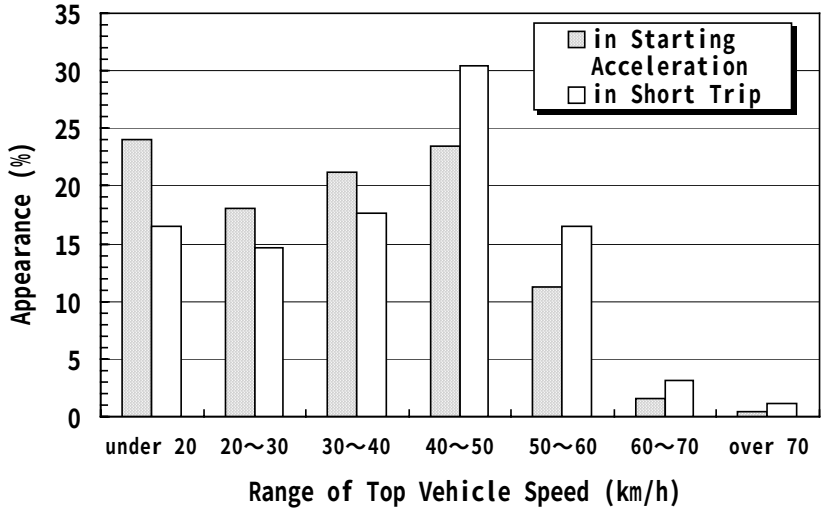


図 2.5　都市内通勤運転のショートトリップ中における初期到達車速と最高車速

図 2.6 は、各トリップ中の加減速度の最大値と平均値を車速変化域別に示す。加速度は低速度域ほど高く、発進から 30km/h までの加速における最大値は約 9km/h/sec（0.25G）、平均値は約 6km/h/sec（0.17G)であり、それぞれ日本の乗用車の公式認証用運転パターンである 10･15 モードにおける加速度の２～３倍に相当する。したがって既存の内燃機関自動車の交通流に乗って走行するためには、発進直後には 8km/h/sec 以上、最高運転車速付近でも 4km/h/sec 程度の加速能力が必要と考えられる。また減速度は、50km/h から停止に至るまでの減速において最大 10 km/h/sec、平均 5 km/h/sec の高い値を示す。動力システムとしてのエネルギ効率を高めるためには、なるべく摩擦制動を使用せず、電力回生制動を活用することが重要であると推測される。

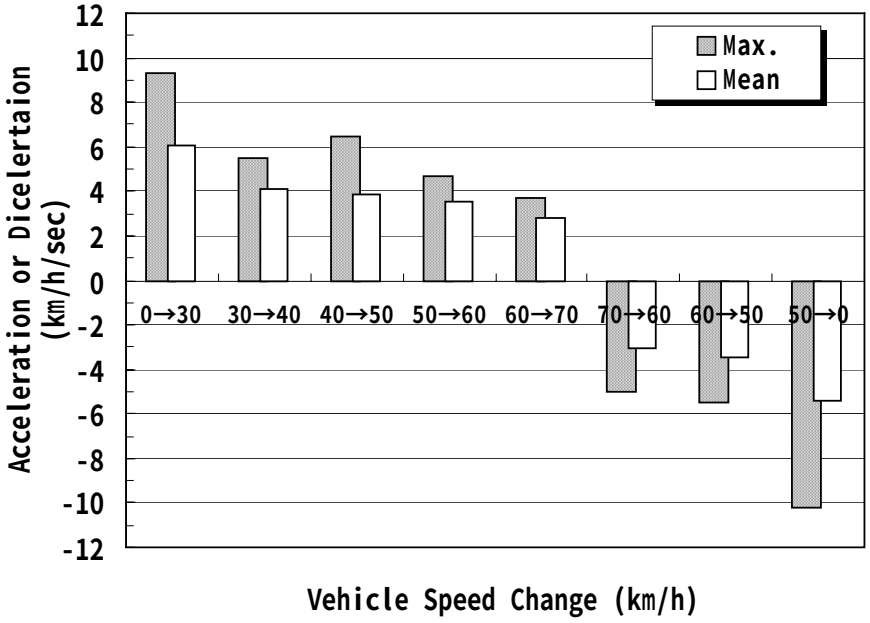


図 2.6　都市内通勤運転における車速変化域別の加速度／減速度

これらの行程において、走行仕事量は車両のエネルギ消費量の主要な指標となる。そこで、下記のように走行仕事量を算出した。

まず、時々刻々の車両に加わる走行抵抗の値は、下記の式で表される。

$$R = R_R + R_A + R_I \quad \cdots\cdots (2\text{-}1)$$

$$R_R = C_R \times M \times g \quad \cdots\cdots (2\text{-}2)$$

$$R_A = C_A \times A \times V^2 \quad \cdots\cdots (2\text{-}3)$$

$$R_I = dV/dt \times (M+m) \quad \cdots\cdots (2\text{-}4)$$

ここでRは全走行抵抗（N）、R_Rは転がり抵抗　（N）、R_Aは空気抵抗（N）、R_Iは慣性加速抵抗（N）である。ただし、C_Rは転がり抵抗係数、C_{AIR}は空気抵抗係数、Mは乗員２名を含む車両総質量（kg）、Aは車両前面投影面積（m^2）であり、また、Vは車速（m/s）、mは車両回転部分の慣性相当質量（kg）、gは重力加速度（m/s^2）である。

したがって、走行仕事率P（kW）は下記の式で表される。

$$P = (R \times V)／1000 = [(R_R + R_A + R_I) \times V]／1000 \quad ・・・・・(2\text{-}5)$$

よって一走行区間、および単位走行距離（1km）あたりの走行仕事量（エネルギ）は下記の式で算出される。

$$E = \int_{t_1}^{t_2} p\,dt \quad ・・・・・(2\text{-}6)$$

$$E_{MEAN} = \int_{t_1}^{t_2} p\,dt \Big/ \int_{t_1}^{t_2} (V/3600)\,dt \quad ・・・・・(2\text{-}7)$$

ただし、この積算の過程で走行仕事率Pが減速時に負の値をとる場合は、P=0 とする。またEは一走行区間の走行仕事量（kWh）、E_{MEAN}は走行 1km当たりの平均走行仕事量（kWh/km）、t_1は走行開始時刻、t_2は走行終了時刻である。

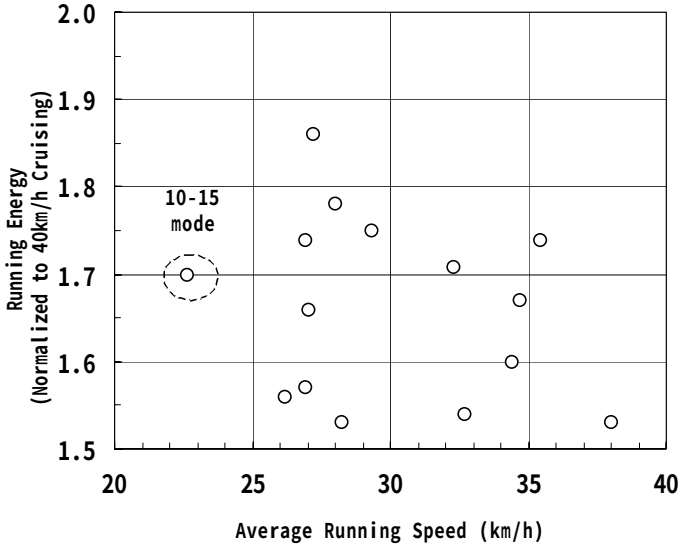


図 2.7　都市内通勤運転における走行中の平均車速と走行仕事量

上記の式 2-5～2-7 により、図 2.3 に示した通勤走行における車両の走行仕事量を１行程毎に計算した。その結果を図 2.7～図 2.9 に示す。ここでは経路毎の運転状態の違いによる走行仕事量のばらつきを観察することを目的とするため、走行仕事量は１行程毎の積算値ではなく、それを走行距離で除した 1㎞ 当たりの平均値とした。また調査車両は後述するコミュータカーとは質量等が異なり、走行仕事量の絶対値も大差があるため、そのままではコミュータカー用動力システムの検討資料とすることはできない。そこで通勤走行における走行仕事量は、調査車両の 40㎞/h 定速走行時の走行仕事量を基準（＝１）として正規化した値として示した。減速時に走行仕事率が計算上で負の値となる場合はこれを零とした。これらの図中には参考のため、10･15 モード運転における計算結果も併記した。

図 2.7 は、１行程毎の走行中の平均車速と 1㎞ 当たりの走行仕事量を示す。何れの行程でも平均車速は 40㎞/h 以下であるが、加減速が頻繁であることを反映して、走行仕事量は 40㎞/h の定速走行時の 1.5～1.9 倍程度の値を示している。式 2-3 より、車両の走行抵抗のうち空気抵抗は車速の２乗に比例するため、空気抵抗により生じる走行仕事量も車速の２乗に比例する。したがって単純に考えれば、走行中の平均車速が高いほど全走行仕事量が増大するものと予想される。しかし、これらの都市内通勤走行においては、一行程毎の平均車速と 1㎞ 当たりの走行仕事量との間に相関性はほとんど認められない。

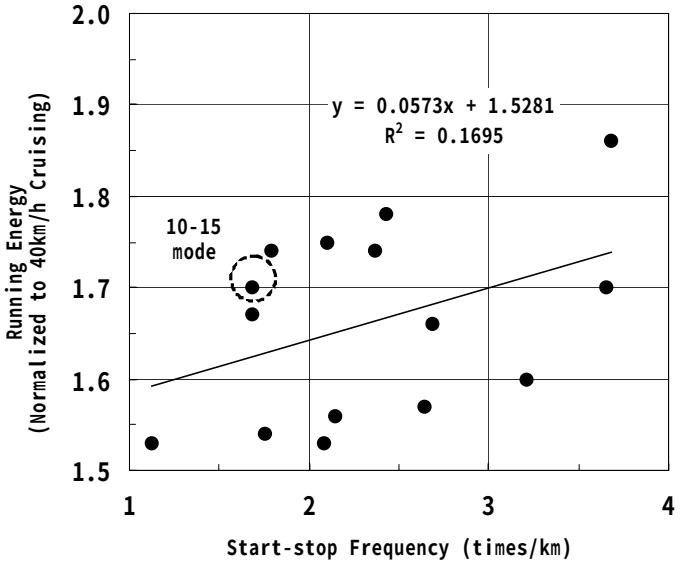


図 2.8　都市内通勤運転における発進・停止頻度と走行仕事量

図 2.8 は、各行程における 1㎞ 当たりのショートトリップ数、すなわち走行距離ベースでみた発進・停止の頻度と、走行仕事量の関係を示す。この図から、多くの行程における発進・

停止の頻度は、10・15 モードと比べてその 1.2～1.8 倍と高く、また発進・停止の頻度と走行仕事量の間には、弱いながらも正の相関性が認められる。

各行程における１秒毎の走行中の車速の標準偏差と、１㎞当たりの走行仕事量の関係を図 2.9 に示す。ここで、標準偏差は車速変動の絶対的な大きさを代表する指標として選定したもので、発進・加速の頻度に加え、平均車速に対する加減速の幅の広さを反映するものである。この図から、車速の標準偏差と走行仕事量の間には明確な正の相関性が見られる。したがって、発進停止や走行中の加減速による車速の変動が大きい行程ほど、走行仕事量が多くなる傾向があるといえる。これらの路上走行による測定結果から、都市内における通勤等の短距離走行は、下記のような特徴を有するといえる。

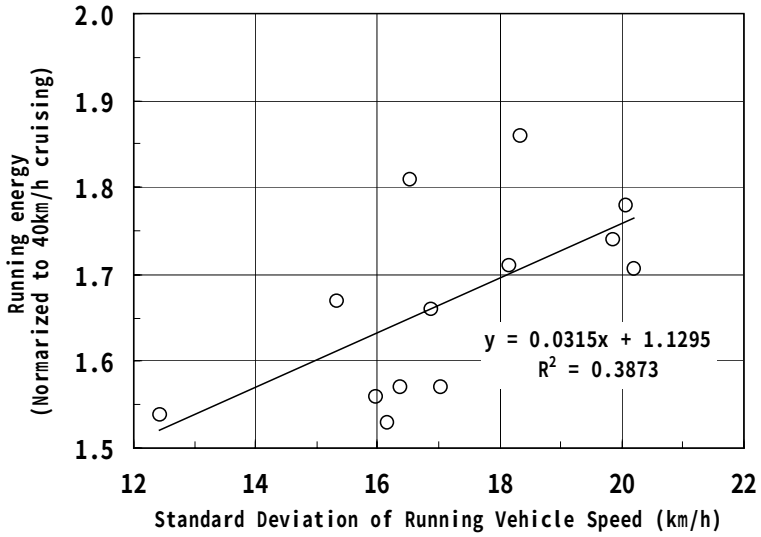


図 2.9　都市内通勤運転における走行中の車速標準偏差（１秒毎）と走行仕事量

(1) １日の走行距離は概ね 50㎞以下であり、全運転時間の 20～30%は停車時間である。
(2) 概ね個々のショートトリップにおける初期到達速度は 50㎞/h 以下、最高運転速度は 70㎞/h 以下であり、最大加速度は 10㎞/h/sec 近い値を示す。
(3) 走行１㎞当たりの発進・停止の頻度は 10・15 モードの 1.2～1.8 倍と高く、走行仕事量は平均車速よりも主に発進・停止等に伴う車速の変動の大きさに強く影響される。

以上の結果から都市内走行のコミュータカーには、従来のガソリン機関駆動方式と比較して、停車中の無駄な機関のアイドリングが不要で、発進加速時等の低速域において最大トルクを発生し、また制動時のエネルギ回生が可能な電動機駆動方式を全面的に採用することが適切であると判断される。また１日当たりの走行距離の点からは、車載電池のみを電源とす

る純電気動力方式の採用も一応は可能であると考えられるが、航続距離の余裕の無さや充電設備、充電時間に関する制約を考慮すると、車載発電機を主電源とするシリーズハイブリッド方式を採用することがより適切であると考えられる。

2.3 実験装置および実験方法

2.3.1 ２種類のコミュータカーの想定

上記の調査結果から、都市内の短距離用途にシリーズハイブリッド電気動力方式のコミュータカーの導入を考え、実験的な検討を行うために、その車両モデルを想定した。表 2.2 に、本研究で想定した２種類のコミュータカーの諸元を示す。

車両１はトランジスタチョッパ制御の低出力直流分巻電動機システムと３段手動変速機を組み合わせた型である。これは従来のガソリン機関駆動自動車をベースとして機関を電動機に置き換えるという発想に基づくもので、変速機等の動力伝達系はそのまま流用することも可能である。また電動機、制御器が小型であるため質量増加の負担が小さく、製造コストも比較的安価であるという利点を有する。

表 2.2 設定した模擬コュータカーの諸元

Item		Vehicle-1	Vehicle-2
Vehicle Mass (kg)		800	
Front Projection Area (m2)		1.7	
Traction Motor System	Type	DC Shunt	AC Induction
	Max. Power (kW)	20/5400rpm	40/6000rpm
	Max. Torque (Nm)	60/3450rpm	125/3000rpm
	Controller	Transistor Chopper	IGBT PWM Inverter
Storage Battery Set	Type	Lead-acid (Open)	Lead-acid (Sealed)
	Voltage (V)	120 (12×10)	240 (12×20)
	Capacity (Ah)	150	25
Transmission		3-speed	Fixed
Wheel Diameter (m)		0.5	
On-board Generator	Engine	DI Diesel	
	Rated Output Power (kW)	2.4	

一方、車両２はインバータ制御の高出力交流誘導電動機システムと固定減速機を組合せた型である。これは電気動力方式としての専用設計を前提とするもので、電動機の特性を活かして変速機を省略することを主眼とする。またパワーエレクトロニクス技術の進歩により、誘導電動機の加減速制御が容易となり車両への応用が可能となったことを反映したもので、直流電動機に比べてエネルギ変換効率やエネルギ回生、また堅牢性の向上が期待できる。

この両車はともに、電動機システムの主電源は小型ディーゼル機関で駆動される車載発電機とし、この発電機の出力平準化と、減速時の回生電力吸収、および機関停止中の短距離走行を可能とするため、鉛酸電池を補助的な蓄電装置として搭載することとした。

また駐車中には外部電源による車載電池の充電も可能であると想定し、外部電源からの充電により運転前に電池内部に蓄積された電気エネルギを「外部充電エネルギ」、運転中に発電機から供給される電気エネルギを「発電機エネルギ」と定義した。

なお本研究では、表 2.2 で想定したコミュータカーの車両製作は行わず、各々を台上実験装置上に模擬的に設定することとした。

2.3.2　実験装置と実験条件

(1) 模擬車両１　　図 2.10 は、模擬車両１の実験装置を示す。車両１は市販の電気自動車（軽貨物車両）をベース車両として、これをシャシダイナモメータ上に設置し、ダイナモメータ側で想定車両と等価の回転慣性質量および定速走行抵抗を設定した。駆動電動機システム、運転操作装置、変速機等はベース車両の搭載品をそのまま利用した。

車両１の加減速運転に当たっては、実験者が車両の運転席に座ってアクセル、ブレーキ、クラッチの各ペダルと変速機を操作した。ベース車両に比べて車両質量が大幅に小さく、また高速走行の頻度が低いため、ベース車両の変速段のうち１速と５速は不要と考えた。そこで変速段はベース車両の変速段の２速～４速のみを限定使用し、これらを車両１の１速～３速とみなして変速操作を行った。なおベース車両ではブレーキペダル操作は摩擦制動のみを作動させ、電力回生制動は内燃機関自動車のエンジンブレーキと同じように作用するが、車両１もそれと同様とし、減速途中におけるシフトダウンは行わないこととした。

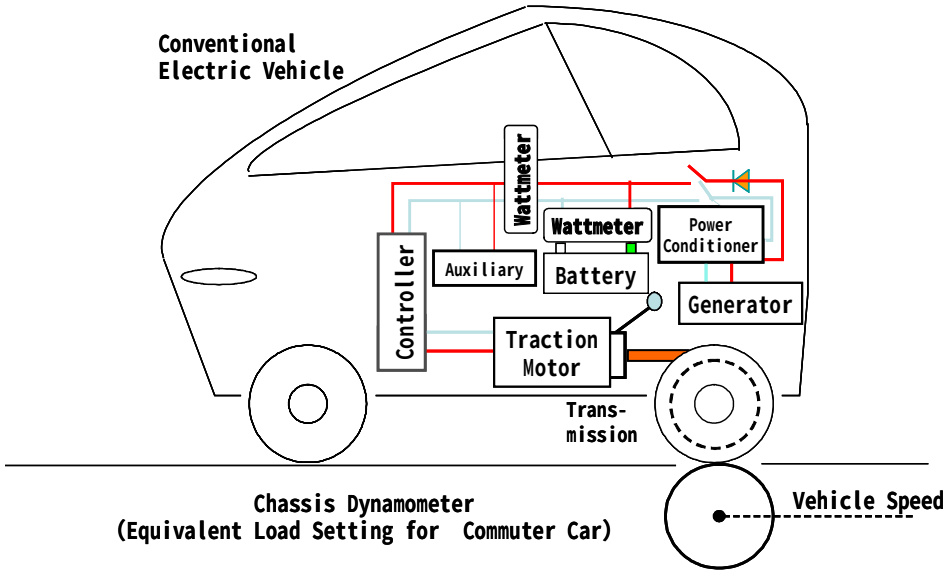


図 2.10　模擬車両１の台上実験装置

(2) 模擬車両２　　図 2.11 は、模擬車両２として試作した台上実験装置の構成を示す。車両２の場合は電動機システムのみ実機を使用することとして、単体台上運転装置上の一端に表 2.1 の駆動電動機を架装し、その回転出力軸は可撓式軸接手を介して、回転慣性板ユニットと電磁パウダブレーキが取り付けられた主軸に接続した。

車両２の慣性加速トルクならびに減速時の制動トルクは回転慣性板ユニットにより再現することとした。元来は渦電流式電気動力計の付属機器として製作されたもので、加減速より生じる大きなトルクを慣性質量そのもので発生させるため、直流式電気動力計等と比べて大容量の電源設備が不要であるという利点を有する。その主要部分は６種類の慣性円板と回転主軸等から構成され、個々の慣性円板は回転主軸に対し脱着可能な構造となっている。これらの慣性円板を組み合わせることによって想定車両と等価な慣性質量を設定した。慣性板ユニットの設定慣性質量と想定車両の質量、および電動機から駆動輪までの仮想的な総減速比の関係は次式のとおりである。したがって、同一の車両質量に対して慣性板ユニットの慣性質量を増減することにより、複数の総減速比を設定することが可能である。

$$I_{IU} = [(M+m)\times(D/2)^2]/\varepsilon^2 \qquad \cdots\cdots(2\text{-}8)$$

ここで、I_{IU}は慣性板ユニットの設定慣性質量（kgm^2）、Mは想定車両の総質量（kg）、mは想定車両の回転部分慣性相当質量（kg）、εは想定車両の電動機から駆動輪までの総減速比である。Dは想定車両の駆動輪外径（m）を表す。

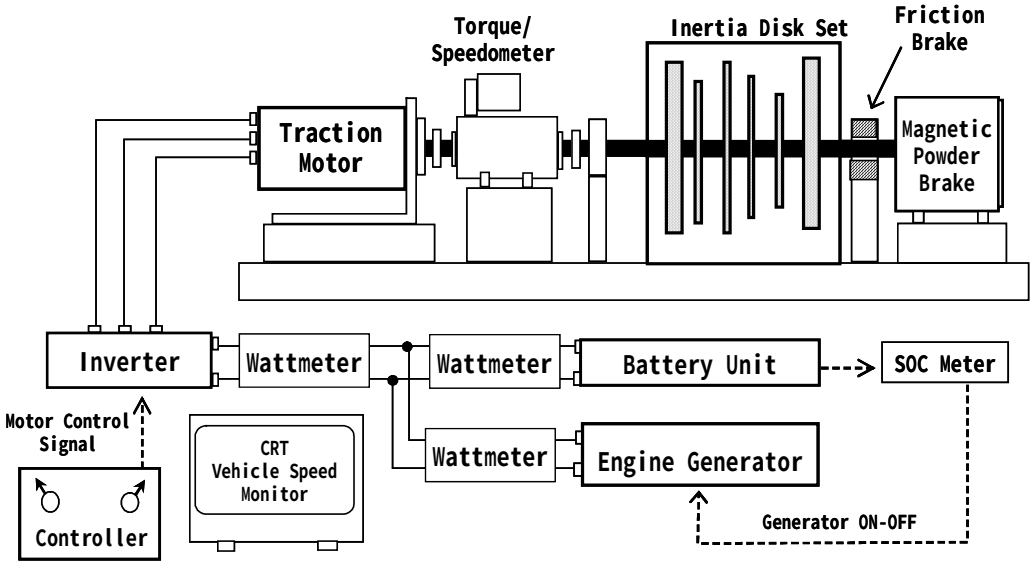


図 2.11　模擬車両２の台上実験装置

また、車両２の転がり抵抗と空気抵抗による負荷トルクは電磁パウダブレーキにより再現した。これは回転軸のロータと固定ケーシングの間隙に挿入された磁性粉体（パウダ）を励磁し固体化させることにより負荷トルクを発生させる装置で、励磁の強弱によりトルクを連続的に変化させることが可能である[5]。この電磁パウダブレーキの負荷トルクと、想定車両の転がり抵抗ならびに空気抵抗との関係は次式で示される。

$$T_P = \{[(R_R + R_A) \times (D/2)] / \varepsilon\} / \eta_M \quad \cdots\cdots (2\text{-}9)$$

ここで、T_Pは電磁パウダブレーキの負荷トルク（N･m）、R_RおよびR_A はそれぞれ式(2-2)ならびに式（2-3)で示した転がり抵抗と空気抵抗（N）、η_Mは駆動系の機械伝達効率である。

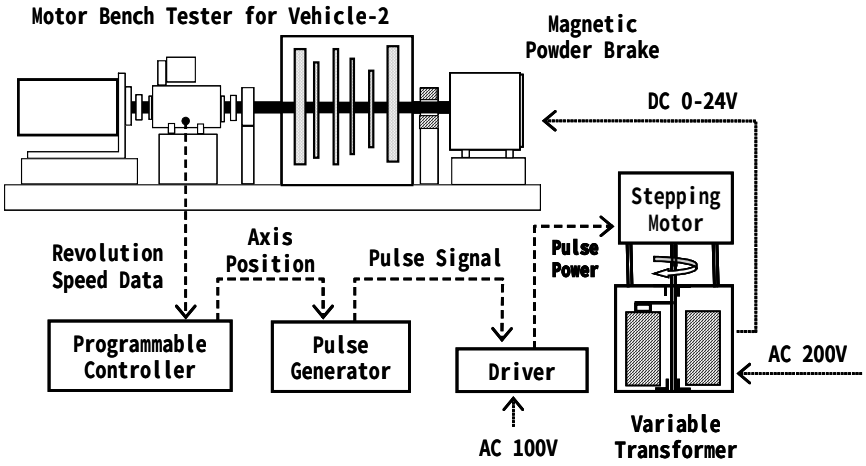


図 2.12　車両２の台上実験装置における転がり抵抗・空気抵抗の再現機構

表 2.3　転がり抵抗・空気抵抗の再現に使用した機器の諸元

Item		Specification
Programable Controller	Analog Signal Input	Range 0-10V
	Program Memory	3.2kW
	Signal Output	Transistor 8-points×2
	Interface	RS232C
Pulse Generator for Stepping Motor	Position Data	Max. 241 data
	Positioning	Absolute:±8,388,600 pulse
	Operating Speed	1kHz
	External Controll	by 8-bit Parallel Data
Stepping Motor Set	Basic Step Angle	0.024°
	Reduction Gear Ratio	1:30
	Max Revolition Speed	60rpm

本実験のパウダブレーキの磁性粉体に対する励磁調整は回転摺動式可変変圧器（通称スライダック）を使用した。励磁の強さはその操作軸の回転角度、すなわち二次側出力電圧にほぼ比例する方式である。想定車両の車速変化に応じた転がり抵抗ならびに空気抵抗を自動的に再現するために、この可変変圧器の操作軸をプログラマブルコントローラとステッピングモータを用いて回転させることとした。図 2.12 は電磁パウダブレーキの負荷トルク調節による転がり抵抗・空気抵抗の再現機構、表 2.3 はその構成機器の主要諸元を示す。単体運転装置主軸の回転速度を検出して車速に換算し、そのアナログ信号をプログラマブルコントローラに入力して、可変変圧器操作軸が採るべき回転角度位置を演算する。それをディジタル値としてステッピングモータ制御用パルス発生器に入力し、必要数のパルスを発生させてステッピングモータを小刻みに駆動することにより、可変変圧器操作軸が車速に応じた回転角度位置を採るようにした。

車両Ｂの運転に当たっては、電動機システムの専用操作卓上に取り付けた２基のポテンショメータ（加速用、回生制動用各１基）および切換スイッチを手動操作して、加速または減速の指令信号をインバータに送ることにより、想定車両が路上走行する場合と等価な加減速運転を行った。減速時は回生制動機能を最大限に活用し、制動力が不足する場合は摩擦制動を併用した。摩擦制動装置は電磁吸着式であり、制動トルクは電磁石の励磁の強弱を上記の電磁パウダブレーキ用のものと同じ回転摺動式可変変圧器により手動調節することによって変化させることができる[8]。この車両２を模擬した実験装置における電動機の回転速度、トルクおよび機械出力は式（2-1）～（2-7）および次式により求められる。

$$\omega_m = [V / (D / 2)] \times \varepsilon \qquad \cdots\cdots (2\text{-}10)$$

$$Tm = [R \times (D/2) / \varepsilon] \times (1/\eta_M) \qquad \cdots\cdots (2\text{-}11)$$

$$Pm = (Tm \times \omega_m) / 1000 \qquad \cdots\cdots (2\text{-}12)$$

ここで、ω_mは電動機回転速度（rad/s）、Tmは電動機トルク（Nm）、Pmは電動機機械出力（kW）である。Vは車速(m/sec)、Rは路上走行抵抗、Dは想定車両の駆動輪外径（m)、εは電動機から駆動輪までの仮想的な総減速比、η_Mは機械伝達効率を表す。

このように、車両２では回転慣性板ユニットが慣性加速抵抗による負荷トルク、電磁パウダブレーキが転がり抵抗および空気抵抗による負荷トルクを発生する。減速時にトルクが負の値を採る場合は、逆に回転慣性板ユニット側から電動機が駆動される状態となる。

(3) 模擬車両１と模擬車両２の共通事項　これらの模擬コミュータカーに搭載される発電

機の出力を設定するためには、各種の都市内パターン運転における電動機システムのエネルギ変換効率や、制動時に回生されるエネルギを考慮することが不可欠である。しかし実験を行う前ではそれら効率等の数値が未知であるため、まず概算により仮の出力設定を行った。外部充電無しで 10・15 モード運転が繰り返し行えることを要件とし、その運転における走行仕事率の､停車時間を含む全時間平均値を式 2-1～2-5 に従って計算すると､約 2.0kWとなる。これを踏まえ、電動機システムの平均的な電気－機械エネルギ変換効率を 75%とし[9]、回生制動により消費電力量が 10%低減されると仮定すれば、車両の全時間平均消費電力の概算値は 2.4kWとなる。そこで、停車時間中も発電することを前提として、発電出力を仮に 2.4kW と設定し、以降の実験によりその妥当性を考察することとした。車載発電機は停車中も含めて常に定速回転・定格出力で稼働し、電池残量（ＳＯＣ）が 40%以上 80%以下の範囲に留まるように必要に応じて発電機を停止または再起動させることとした。

これらの模擬コミュータカーの台上運転に当たっては、シャシダイナモメータのローラ、または単体台上運転装置主軸の回転速度から換算した車速が指定車速パターンと共に表示されるＣＲＴドライバーズエイド[10]を、加減速操作の指標として用いた。

表 2.4　測定に使用した電力計の諸元

Item		Soecfication
Measurement Range	Voltage	500V
	Current	200A
	Power	200kW
Accuracy	Voltage	±1%rdg±1dgt
	Current	±1%rdg±4dgt
	Power	±1%rdg±6dgt
Current Sensor	Type	Cramp-on
	Max. Wire Diameter	20mm

測定項目は車速等の車両運転状態、および電動機システム等の出入電力等とし、各々の測定器からアナログデータをペンレコーダ付データロガに入力して、内蔵のフロッピィディスクに連続的に記録した。出入電力の測定にはクランプ式電流センサを有する電力計を使用した。その電力計の仕様を表 2.4 に示す。電動機システムの測定対象は、チョッパ制御器またはインバータ制御器における電源側の直流電力とした。フロッピィディスクに記録したデータは測定後にパーソナルコンピュータの表計算ソフトウェアを用いて処理、解析し、その中

で電力データは入力・出力の別に積算して電力量を算出した。

なお検討の順序としては、まず電動機駆動方式をコミュータカーへ導入することを主眼として、車両の動力性能および電動機システムの電力出入に関する考察を行うこととした。これは電源部分の違いを除いては、純電気動力方式や燃料電池動力方式と共通する内容である。次にシリーズハイブリッド方式特有の課題である、車載発電機からの最適な給電方法について検討し、最後にそれらの結果に基づいて本実験で提案したシリーズハイブリッドシステムの総合的なエネルギ効率等の評価を試みた。

2．4　実験結果と考察

2.4.1　都市内走行の性能要件と駆動系の基本仕様

図 2.5 に示すように、発進・停止が頻繁な都市内走行に使用されるコミュータカーの動力性能としては、発進から 50㎞/h 付近に至るまでの加速能力が最も重要であると考えられる。

２種類の模擬コミュータカーの加速能力の計算値を、定速走行時の走行抵抗とともに図 2.13 に示す。車両１の加速能力は、１速での発進直後は 10㎞/h/sec を示すが、駆動電動機の基底回転速度（3,300rpm）を超える 20㎞/h 以上では急激に低下し、30㎞/h で電動機の回転速度が上限に達する。それより高い車速領域で上段の変速段に変速しても、車速に反比例して電動機のトルクが小さくなるので、加速能力が著しく低下する。これに対し車両２の加速能力は発進から 50㎞/h 付近まで 8㎞/h/sec 程度を維持することができ、それ以上の車速領域においても十分な余裕を持つと予想される。

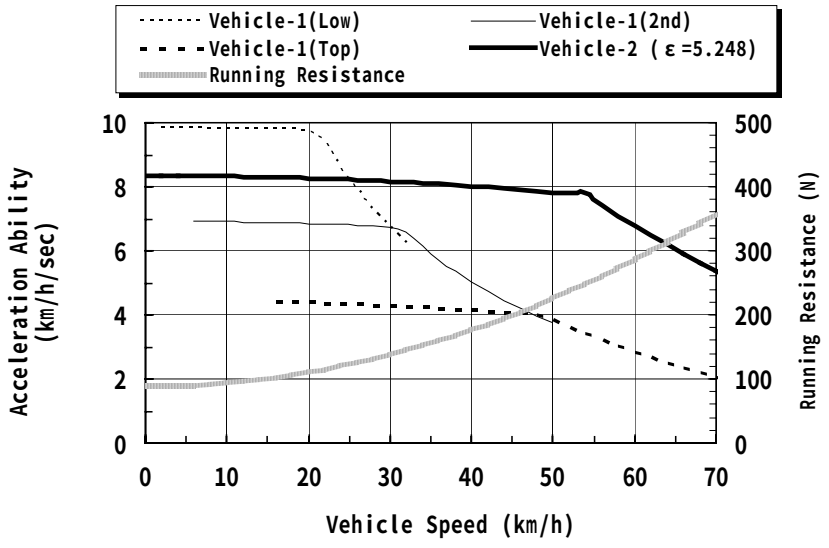


図 2.13　全力発進加速度と定速走行抵抗（計算値）

図 2.14 は、全力発進加速の測定結果を示す。車両１では変速機位置１速からの発進と２速からの発進を試み、車両２では２種類の固定減速比を設定した。車両１の１速発進では、発進直後の加速度は高いが、30km/h で変速操作を必要とし 1.5 秒程度の加速中断を強いられるため、代表的な初期到達速度である 50km/h まで一気に加速することは不可能である。さらに 50km/h 以上へ加速するためには再度の変速操作と加速の中断を余儀なくされる。車両１の２速発進の場合は、50km/h までの所要時間は１速発進の場合より約 1.5 秒短縮されるが、それ以上の車速域へ加速するためにはやはり変速操作が必要となり、加速能力も顕著に低下する。これに対し車両Ｂは発進直後の加速度は車両Ａよりも若干低いが、変速無しの連続加速により、50km/h に到達するまでの所要時間は車両Ａよりも 1.5～２秒程度短い。さらに初期到達車速の最大値と考えられる 70km/h まで一気に達することも可能である。

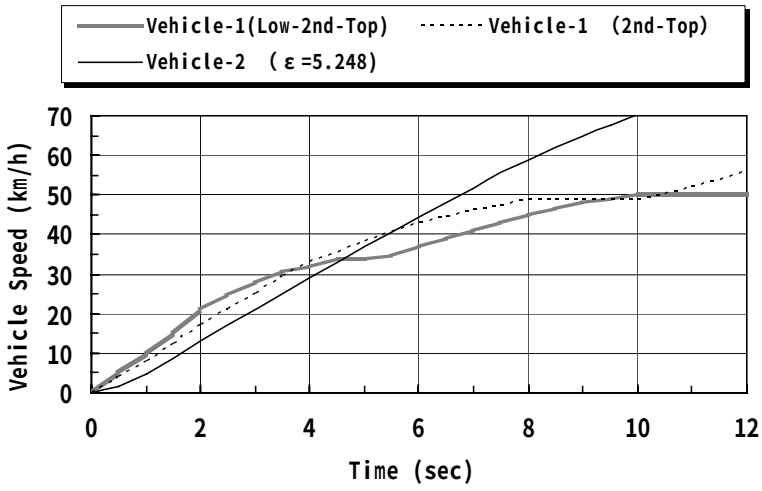


図 2.14　発進加速状況の比較

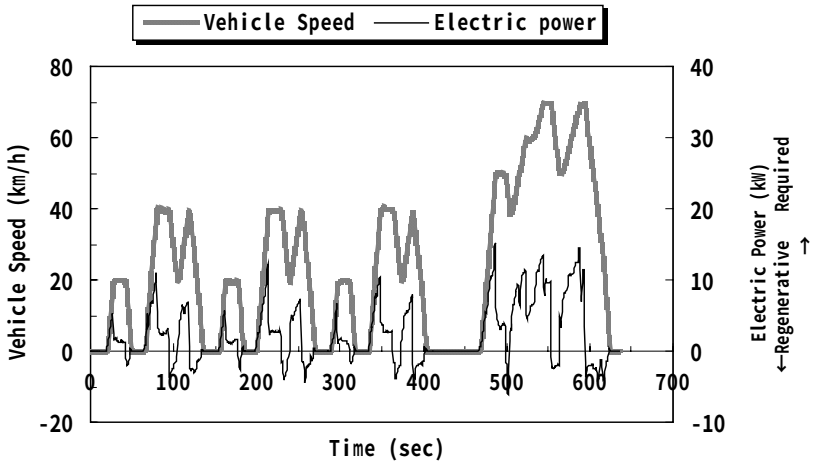


図 2.15　10・15 モード運転における車速とモータシステム入出電力の変化（車両２）

これらの結果から、発進加速性能の向上には電動機の駆動トルクの向上に加え、変速操作の省略が極めて有効であるため、車両１よりも車両２のタイプ、すなわち高出力電動機と固定減速機の組合せの方が発進加速能力の点からみて都市内走行への適合性が高いと判断される。

加減速運転時における駆動電動機システム（補機類を含む）の電力入出状況について、車両Ｂの 10・15 モードを例として図 2.15 に示す。本実験では電動機システムが力行時に要求する入力電力（以後、「要求電力」という。）を正の値、制動時に運動エネルギを電気エネルギに変換して出力する電力（以後、「回生電力」という）を負の値と定義する。要求電力は車両の発進加速時や途中加速時は急激に立ち上がるが、定速走行に移ると大幅に減少し、減速時は電動機側から回生電力が出力されるというように、電力の大きさと入出力方向が加減速の状況に応じて頻繁に変化していることがうかがえる。

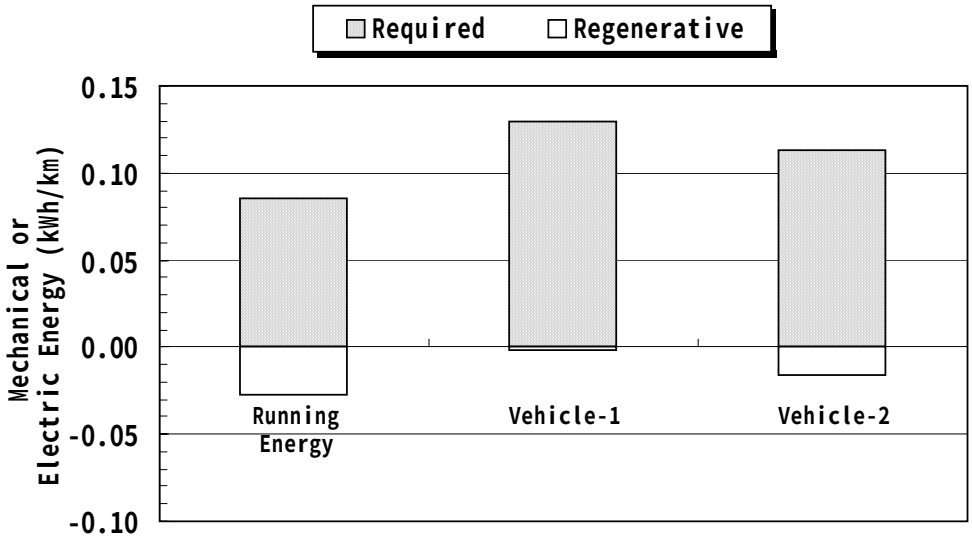


図 2.16　10・15 モード運転時の要求電力量と回生電力量

この 10・15 モード運転における模擬コミュータカーの走行１㎞当たりの要求電力量、回生電力量（測定値）を、その走行仕事量、回生仕事量（計算値）と対比して、図 2.16 に示す。車両１は小型で低出力の電動機を搭載しているが、要求電力量は高出力の電動機を搭載する車両Ｂよりも約 15%多い結果となった。その原因は、車両１においては電動機を高トルクで使用することにより巻線等に大電流が流れ、電気抵抗損失（銅損）が急激に増大して効率が低下するためと推測され、電動機の小型化が省電力化に繋がらないものと解釈される[11]。これは一般的に大排気量の内燃機関を搭載するほど燃費が悪化する従来の自動車とは大幅に異なる傾向である。一方、計算上は走行仕事量の約 30%が回生仕事量として回収可能である

のに対し、要求電力量に対する回生電力量は、車両２では約 15%を示したが、車両１ではわずか２%以下に留まっている。これは、車両１では回生制動の優先使用を行なわないことに加え、減速時には発進加速時よりも高位の変速段を使用するため電動機回転速度が低くなり、回生の起電力が低下するためと考えられる。ただし車両１と車両２の電動機システムは、電動機の種別や制御方式が異なり、電池の電圧、容量にも差があるため、特に電力量に関する上記の対比結果は一概に電動機出力の高低や減速機構の違いだけに起因するとは断定できない。例えば、同程度の出力の誘導電動機と直流電動機のエネルギ変換効率を比較すると、前者は後者を５%前後上回るとされる[12]。しかしながら、車両１と車両２の要求電力量および回生電力量の差はそれを大幅に超えるレベルを示しているため、そのような差が生じたのは主に上記で推測した原因によるものと考えられる。

以上の結果からは、発進加速性能、および要求電力量の低減と回生電力量の向上という観点で、高出力電動機を固定減速比で使用する車両２の方式が、低出力電動機と手動変速機を併用する車両１の方式に比べて有利であると判断される[11][13]。また電動機システムの種類としては、効率の点からは直流分巻電動機システムよりも交流誘導電動機システムの方が望ましい。したがって、以降の実験、検討は車両２のみを対象として行うこととした。

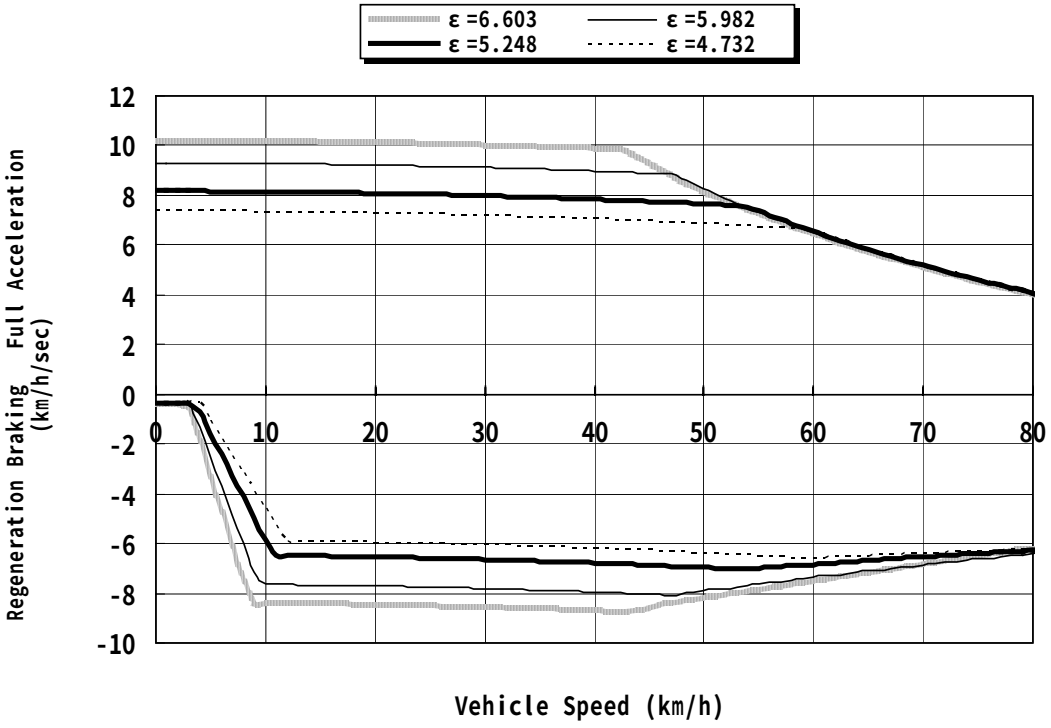


図 2.17　固定減速比と、全力加速能力および回生制動能力（車両２）

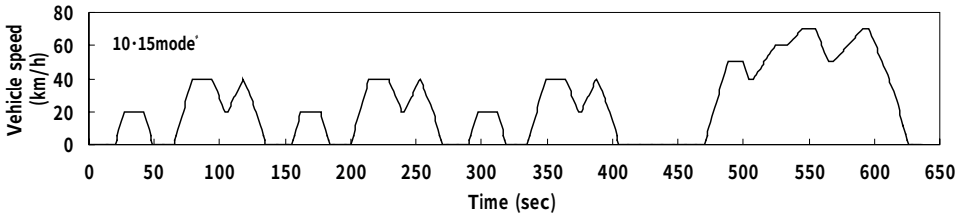
車両２の電動機から駆動輪に至るまでの固定減速比を 4.732～6.603 の４通りに設定した場合について、最大加速能力と、電力回生制動のみによる最大減速能力を計算した結果を図 2.17 に示す。電動機の全負荷トルクは発進から基底回転速度に達するまでは最大値を維持し、それ以上では回転速度に反比例して低下するため、駆動側の加速度曲線の低下が始まる車速は電動機の基底速度点（3,000rpm）に相当する。特に発進加速時には強力で連続的な加速が必要なため、図 2.5 に示した初期到達車速における電動機回転速度は基底回転速度を超えないことが望ましい。これらの要件を考慮すると、減速比を 4.732 とすると、全車速域において最大加速能力は 8km/h/sec 以下となり、発進直後の低車速域における加速能力が不足気味であると考えられる。一方、減速比を 6.603 とすると、発進直後の最大加速能力は約 10km/h/sec と過大であり、また 40km/h を超えると加速能力の低下が始まり、車速が高い領域では電動機の回転速度がその上限近くに達して騒音・振動が増大すると考えられる。なお回生制動側の減速度曲線をみると、10 km/h 以上の車速域において 6～8km/h/sec の最大減速能力を示すため、平均的な減速ならばおおむね停車直前まで必要な制動力が電力回生制動により得られると考えられる。減速比を高く採るほど回生制動による最大減速度は大きくなるが、本実験の電動機システムでは最大制動トルクは最大駆動トルクよりも小さく、また一般的に自動車の走行において減速度の最大値（絶対値）は加速度よりも高いため、実走行中の急な減速をすべて回生制動のみで行うことはできない。したがって、固定減速比としては、上記で検討した 4.732～6.603 の中間的な値を採用すれば、都市内走向の発進加速における性能要件を満足し、減速時においても電力回生制動を有効に活用できると考えられる。

表 2.5　実験で用いた都市内走行車速パターンの代表値

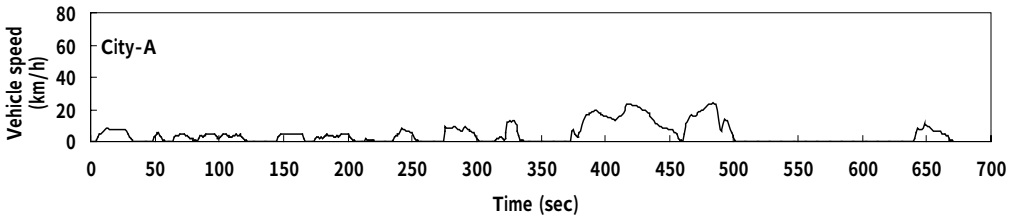
Item	10-15 mode	Actual CIty Driving Pattern				
		City-A	City-B	City-C	City-D	City-E
Max. Vehicle Speed (km/h)	70	24	44	49	58	69
Total Average Speed (km/h)	23.6	4.5	10.1	25.1	21.1	37.7
Running Average Speed (km/h)	33.6	7.9	17.3	29.6	35.8	48.5
Stopping Time (%)	31	42	40	14	40	22
Start-stop Frequency (time/km)	1.7	15.6	4.8	1.8	1.7	0.5
Standard Deviation of Running Speed(km/h)	18.2	6.1	10.3	13.7	16.6	18.0

2.4.2　都市内走行パターン運転における要求電力量と回生電力量

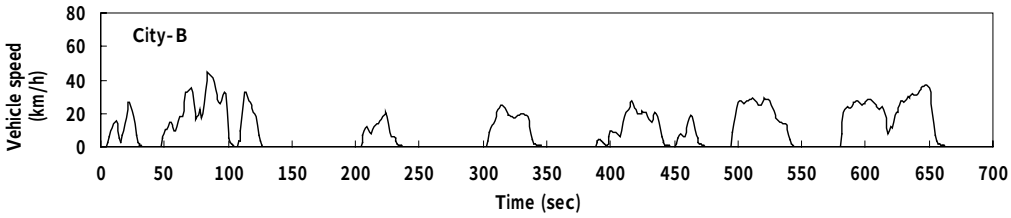
表 2.5 および図 2.18 は、本実験で用いた各種都市内加減速運転パターンの概要を示す。



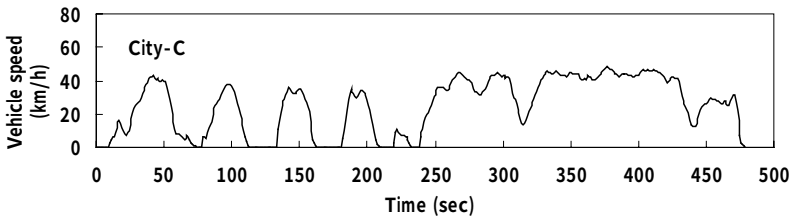
(a) 10・15 モード



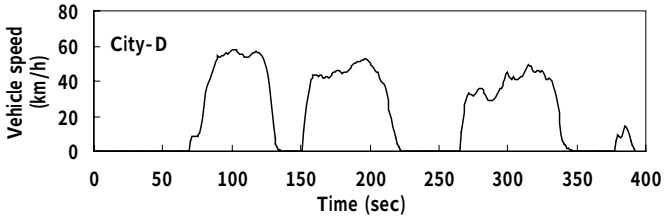
(b) City-A



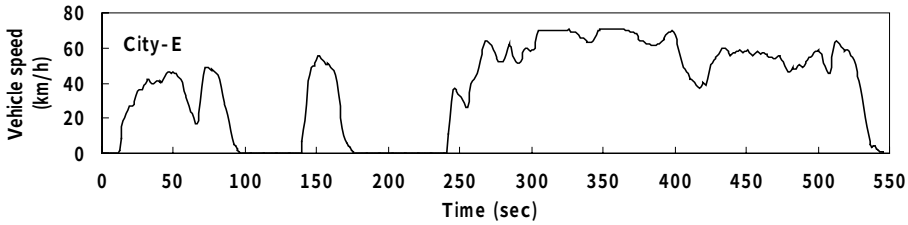
(c) City-B



(d) City-C



(e) City-D



(f) City-E

図 2.18　実験で用いた都市内走行車速パターン

10･15 モードの他に、前述の都市内走行実態調査の車速データの中から、City-A～City-E の５種類の代表的と考えられる実走行パターンを抽出した。元の車速データからの台上実験用車速パターンへの抽出区間は、10･15 モードの運転時間に合わせて、それぞれ 10 分間前後とした。City-A は渋滞が著しい状態の代表パターンで、車速（最高値および平均値）が最も低いデータを選んだ。City-B は City-A よりやや円滑な交通混雑状態の代表パターンで、車速が 10･15 モードの半分程度で発進停止頻度が２倍程度のデータを選んだ。City-C と City-D は、ごく一般的な都市内走行状態の代表パターンで、10･15 モードと比べて平均車速と発進停止頻度がとほぼ同等で最高車速と停車時間率が異なるデータを選定した。また、City-E は自動車交通流が順調な都市内幹線道路走行の代表パターンであり、車速が最も高く、かつ 10･15 モードと同程度の頻度で加減速を繰り返すデータを選んだ。これらのパターンにおける車速（１秒毎）の標準偏差は、表 2.5 に示すように、おおむね 5～20㎞/h の範囲にある。

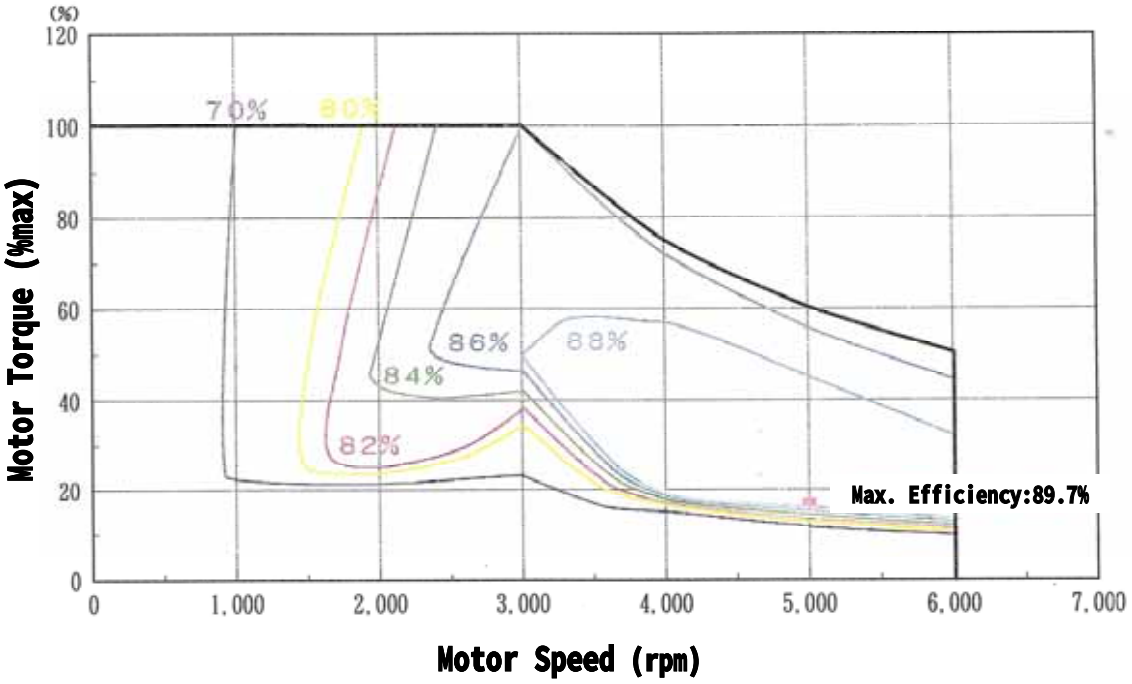


図 2.19　インバータを含む駆動電動機システムの効率線図（車両２、㈱明電舎資料）

車両Ｂの制御インバータを含んだ駆動電動機システムの電気エネルギー機械エネルギ変換効率線図は、（株）明電舎の資料（非公開）によれば、図 2.19 に示すとおりである。効率は中・高回転の中負荷域で高く、最高値は約 90%である。一方 1000rpm 以下の低速回転速度域や 10%以下の低負荷域では効率は大幅に低下する。これに対し、例として 10･15 モード、City-A および City-E で運転する際の電動機使用条件頻度分布（１秒毎の計算値）を図 2.20 に示す。

10・15 モードでは主に低速～高速回転で中負荷領域を使用するが、City-A ではもっぱら低速回転・低負荷領域を使用し、逆に City-E では中～高速回転で低負荷から高負荷にかけての使用頻度が高くなっている。これを図 2.18 と対比すると、変換効率の低い領域を使用する City-A は走行に要求される電力量に占める損失電力量の割合が多く、逆に高効率領域の使用頻度が高い City-E は損失電力量が少ないと予測できる。

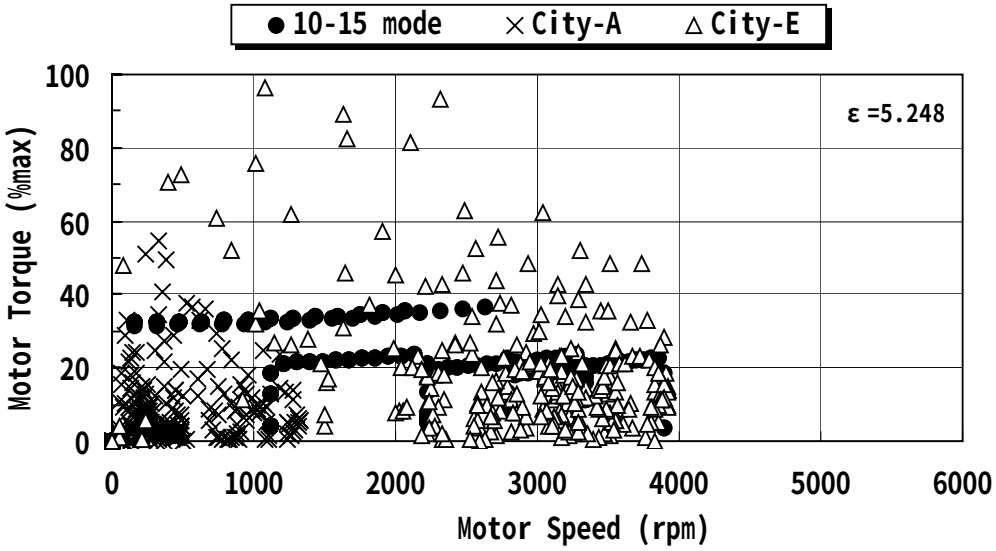


図 2.20　都市内パターン運転時の駆動電動機回転速度とトルクの使用領域（車両２）

電動機システムにおいては、内燃機関とは異なり、設計値に基づいて任意の運転条件における損失電力、要求電力を計算により高い精度で予測することが可能である(11)。電動機システムの損失電力は、電動機本体損失電力と制御インバータ損失電力の和であり、電動機本体損失電力は一次銅損、二次銅損、鉄損、機械損、標遊損により構成される。本実験で使用した三相交流誘導電動機システムの損失電力は、（株）明電舎の資料（非公開）によれば、次式によって算出される。

$$Pcu_1 = 3 \times R_1 \times (I_0^2 + I_T^2) \quad \cdots\cdots (2\text{-}13)$$

$$Pcu_2 = 3 \times R_2' \times I_T^2 \quad \cdots\cdots (2\text{-}14)$$

$$Pfe = 3 \times Rm_0 \times n^{1.6} \times I_0^2 \quad \cdots\cdots (2\text{-}15)$$

$$Pmc = K_0 \times n^{1.6} \quad \cdots\cdots (2\text{-}16)$$

$$Pst = 0.2 \times (Pcu_1 + Pcu_2) \quad \cdots\cdots (2\text{-}17)$$

$$P_{IM} = Pcu_1 + Pcu_2 + Pfe + Pmc + P_{IM} \quad \cdots\cdots (2\text{-}18)$$

$$P_{INV}=K_1\times(I_0^2+I_T^2)\ +K_2\times I_T \qquad \cdots\cdots(2\text{-}19)$$

$$Ptotal=P_{IM}+P_{INV} \qquad \cdots\cdots(2\text{-}20)$$

ここで、Pcu_1は一次銅損、Pcu_2は二次銅損、Pfeは鉄損、Pmcは機械損、Pstは標遊損、P_{IM}は電動機全損失、P_{INV}はインバータ損失、Ptotalは電動機システムの全損失（以上、単位は全てW）である。

ただし、R_1は一次抵抗（Ω）、R_2は二次抵抗の一次側換算値（Ω）、I_0は励磁電流（A）、I_Tはトルク電流（A）、Rm_0は鉄損係数、nは電動機回転速度（rpm）、K_0は機械損係数、K_1はインバータ定常損係数、K_2はインバータスイッチング損係数である。

式（2-10）および（2-11）で示される電動機の回転速度とトルクから設計仕様に基づいて励磁電流とトルク電流を求め、上記の式（2-13）～（2-20）に代入することにより電動機システムの損失電力を計算し、これに式（2-12）で示される電動機の機械仕事率を加算すれば要求電力が求められる。これらを式（2-6)、式（2-7）と同様に積分すれば走行区間にわたる機械仕事量、損失電力量、および要求電力量を算出することができる。

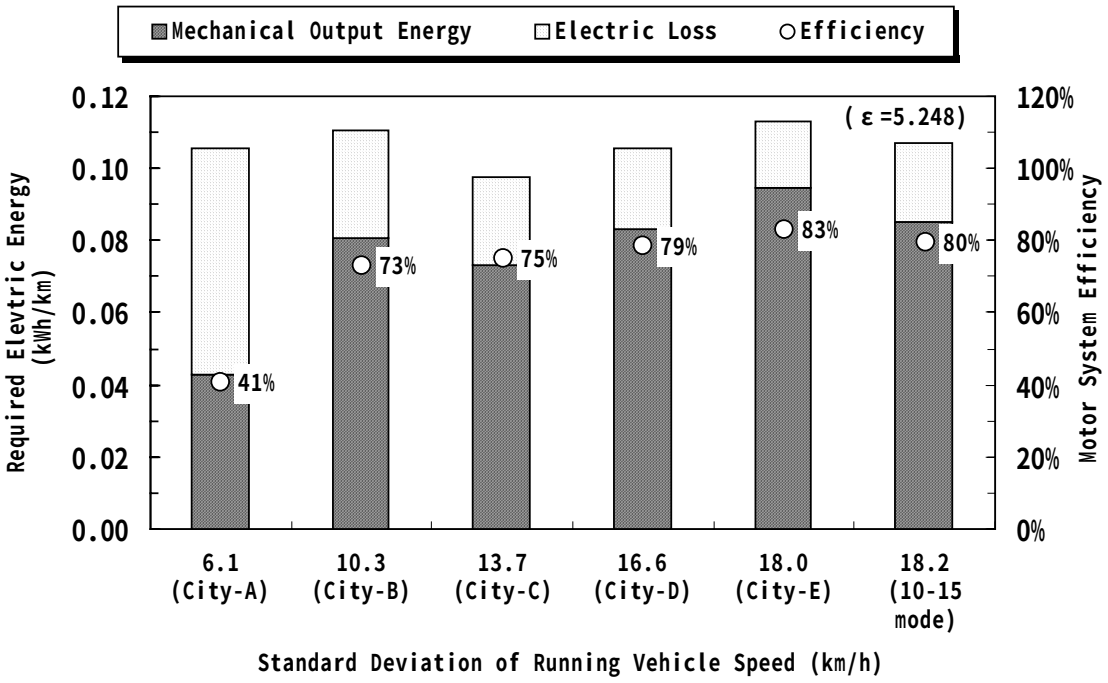


図 2.21　電動機の要求電力量の計算値（車両２、減速比 5.248）

各種都市内パターン運転における電動機システムの機械仕事量と損失電力量、およびその和である要求電力量の計算値を 1km 当たりの平均値として、図 2.21 に示す。図 2.9 の結果を考

慮して、運転パターンは車速の標準偏差の大きさの順に配列したが、この図においてもおおむね車速の変動が大きいパターンほど機械仕事量が多く、標準偏差が最小の City-A では機械仕事量が他のパターンの半分程度である。しかし City-A においては電動機システムにおける損失電力量が機械仕事量の 1.5 倍強に上るため、要求電力量は他のパターンと大差なく、その約 40%のみが機械出力に変換されている。一方、他の運転パターンにおいては電気－機械エネルギ変換効率は 70～80%を示しており、特に City-E では６つの運転パターンの中で最高の 83%を示す。

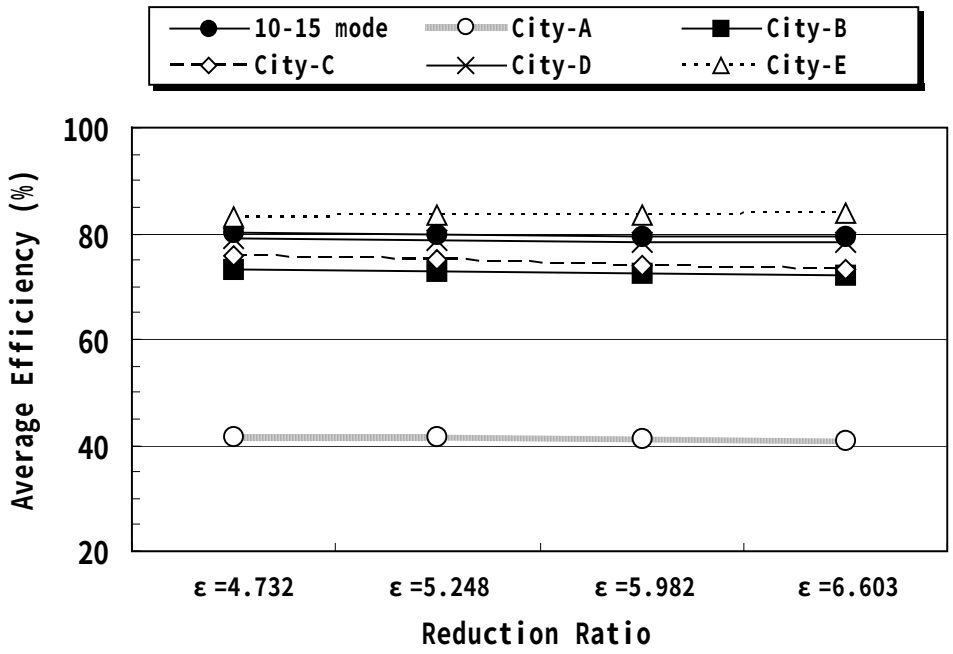


図 2.22　固定減速比と電動機の平均効率（車両２、計算値）

図 2.22 は、固定減速比を 4.732 から 6.603 まで４通りに設定した場合の各種都市内パターン運転における電動機の平均効率の計算結果を示す。減速比を大きくすると、電動機使用領域の高回転側の移行による効率向上と、低負荷側への移行による効率低下の両方が予想される。しかし City-E では固定減速比を大きくすると効率が僅かに向上するが、他のパターンではほとんど変わらない。この結果から、本実験の設定条件内では、都市内走行に必要十分な加速性能を担保した上で、電動機の回転速度を抑制し騒音の低減を図れるように、減速比は 5.248 に採ることが適切であると考えられる。

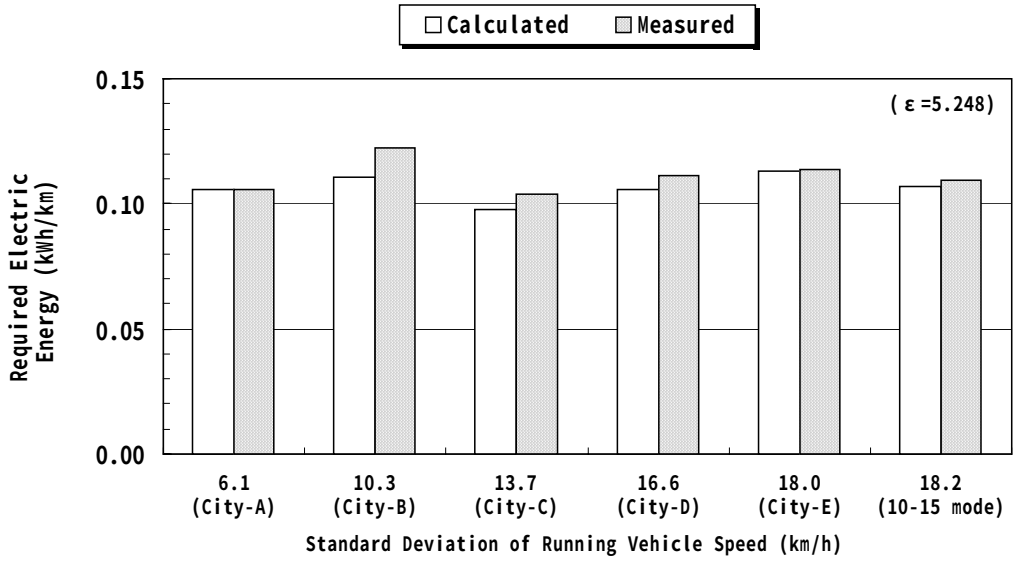


図 2.23　都市内パターン運転における要求電力量の計算値と実測値（車両２、減速比 5.248）

減速比 5.248 とした場合の各種パターン運転における電動機システムの要求電力量の計算値と測定値を図 2.23 に示す。いずれのパターンにおいても、測定値は計算値より若干高めの値を示すものの、両者はほぼ一致している。この結果から、電動車両においては運転パターン、ならびに車両と電動機システムの諸元を設定すれば、上記のような計算による要求電力量や損失電力量の評価が可能であると判断される。

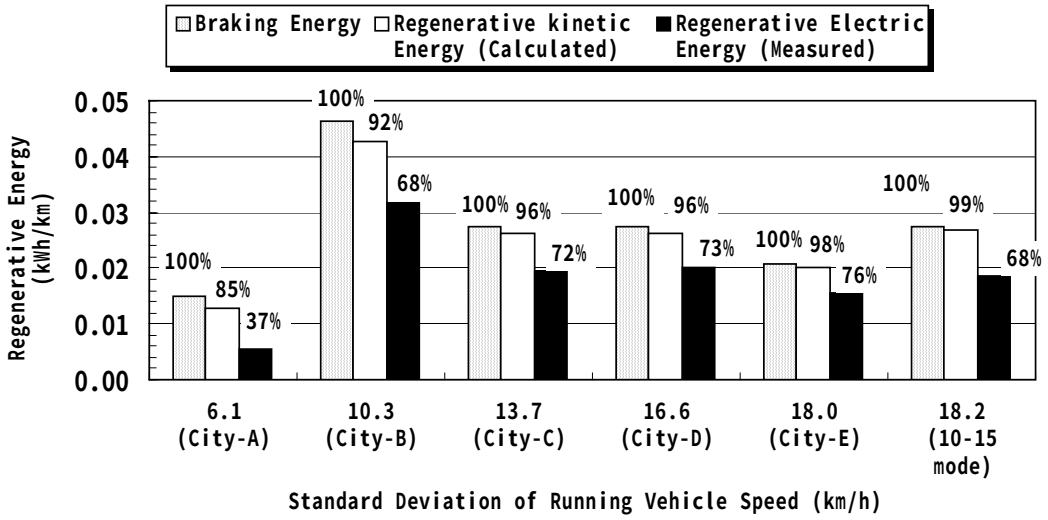


図 2.24　都市内パターン運転における回生エネルギ（車両２、減速比 5.248）

各種パターン運転における全制動仕事量と電動機により吸収可能な制動仕事量の計算値、および回生電力量の測定値を図 2.24 に示す。車両の摩擦制動を含む全制動仕事量をみると、

車速の変動が非常に小幅な City-A で最少となっているが、車速の標準偏差が二番目に小さい City-B で最大となっている。これは図 2.18 に示すように、City-B においては車速は全般的に低めであるが、減速度が高いために、強い制動力を要するためと考えられる。また各パターンにおいて電動機回転軸で吸収可能な制動仕事量を全制動仕事量と比較すると、前者は後者を２～15%下回っている。これは、図 2.17 に示したように電動機の最大回生トルクは最大駆動トルクより小さく、かつ車速が非常に低い時は回生が不可能であるためであると考えられる。一方、制動時の電動機における回生電力量の機械仕事量に対する比率、すなわち機械－電気エネルギ変換効率をみると、電気的な損失割合が大きい City-A では 40%程度と最も低く、他のパターンでは 70～80%程度を示す。全制動仕事量に対する回生電力量の比率をみると、前者の 35～75%が回生電力量として回収されることとなる。

なお、各種パターン運転における要求電力量に対する回生電力量の比率は５～25%であった。制動時のエネルギ回生に関しては、第３章において詳細な検討結果を述べる。

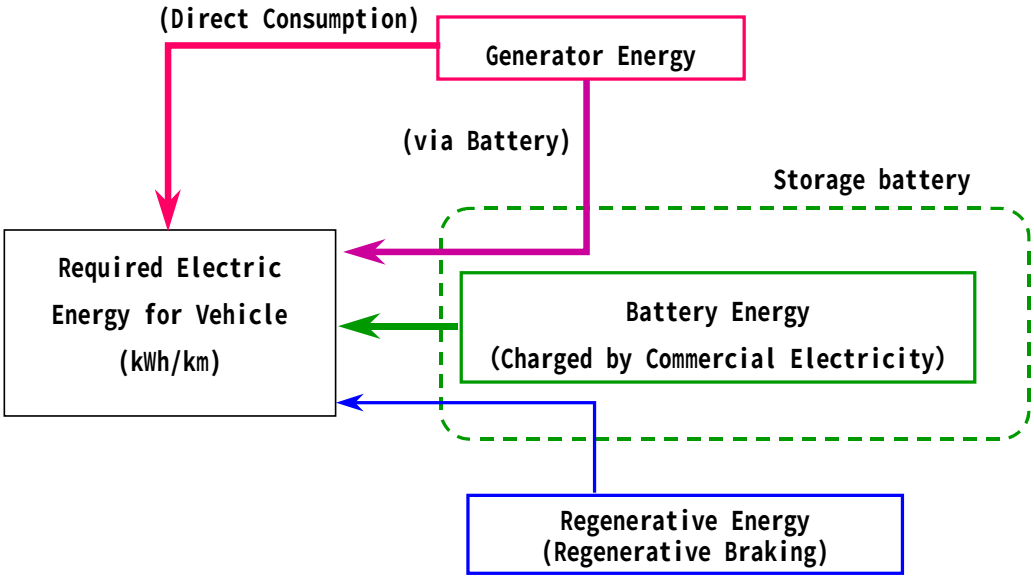


図 2.25　シリーズハイブリッド自動車の車上における電気エネルギの流れ

2.4.3　発電機エネルギの経路と発電機出力の最適化

以上は電動機システムによる車両駆動に関する検討であるが、これをシリーズハイブリッド動力システムとするためには、車載発電機による適切な給電方法について考察することが不可欠である。

(1) 車上におけるエネルギの流れ　　内燃機関駆動自動車における車上のエネルギの流れは、燃料タンク→内燃機関（化学エネルギを機械エネルギに変換）→駆動輪という、単一経路で

かつ一方向の極めて単純な形をとる。また純電気自動車においては、力行時は車載電池→電動機システム（電気エネルギを機械エネルギに変換）→駆動輪であり、回生制動時はその逆となる。すなわち単一経路で双方向の形をとる。これらに対し、本実験で想定したシリーズハイブリッド方式のコミュータカーは、前述のように電源として外部充電エネルギと発電機エネルギを併用する。さらに発電機エネルギについては、電動機システムで直接使用される分と、電池の充放電を経て使用される分があるため、図 2.25 に示すように、運転中の車上における電気エネルギの流れは内燃機関駆動自動車や純電気自動車に比べて複雑な形となる。

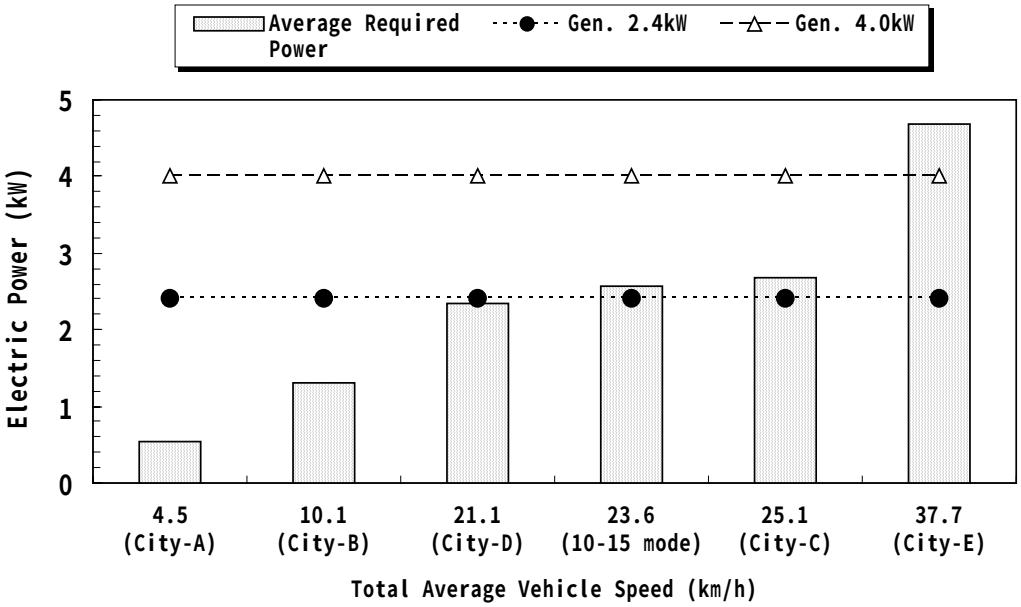


図 2.26　電動機システムの平均要求電力と発電機の定格出力

(2)パワーベースでみた電力需給　　各種都市内パターン運転における平均要求電力（停車時間を含む全時間平均値）と発電電力（一定値）を図 2.26 に示す。この図では、発電機エネルギの供給・蓄積は停車時間中も行われることを考慮し、車速パターンの配列は、平均要求電力との関連性が車速の変動よりも強いと考えられる平均車速（停車時間を含む全時間平均値）の順とした。運転中の平均要求電力はパターンによって大差があり、渋滞の City-A では非常に小さく、流れの速い City-E では 10・15 モードの 2 倍近い値を示す。

発電出力を前述の仮設定値の 2.4kW とすれば、10・15 モードおよび City-C、City-D の運転においては発電電力と平均要求電力がほぼ等しくなり電池のエネルギ収支が均衡すると考えられるため、外部充電無しでそれらのパターンを繰り返し運転することが可能であると予測される。また車速が低い City-A、City-B の場合は、発電電力が平均要求電力を大幅に上

回り、常時発電状態でパターン運転を繰り返すと電池の内部エネルギが漸増するため、発電機の停止・再起動が必要となる。逆に City-E では発電電力が平均要求電力を大幅に下回るため、City-E の運転を繰り返すと常時発電状態でも電池の内部エネルギは漸減していき、遂には運転不能に至ることとなる。したがって都市内運転において、渋滞パターンから速いパターンまでが混在する場合、または 10･15 モードのような中間的なパターンを繰り返すような場合は、発電出力は 2.4kW で十分であると考えられる。しかしながら交通の流れが速い幹線道路走行の比重が高い場合等は、発電出力は 2.4kW では不足することが予想される。

これに対し、車載発電機の能力を増強し発電出力を４kW とすれば、City-E を含む本実験の全てのパターン運転の繰り返し運転がほぼ可能となり、都市内用途としての実用性が高まると考えられる。

(3) 発電機エネルギ有効係数と電気エネルギの収支　発電機エネルギのうち、電池経由分については充放電の際にその一部が熱として失われるため、電動機システムで有効利用が可能な電気エネルギ（電力量）は発電電力量を多少下回ることとなる。シリーズハイブリッド方式は電池等の蓄電装置により発電用機関の出力を平準化して熱効率向上を図ることが大きな特長であるが、電池等における充放電損失は動力システムとしてのエネルギ効率を左右するため、これを定量的に評価することは極めて重要であると考えられる。そこで「発電された発電機エネルギ」に対する「有効利用可能な発電機エネルギ」の比率を「発電機エネルギ有効係数」と定義した。これは、純電気動力方式における電池の充放電効率（エネルギベース）の概念を、シリーズハイブリッドシステムに拡張したものである。一つのパターン運転における発電機エネルギ有効係数は、次式で示される。

$$E_{EG1} = E_{EGD} + E_{EGB} \quad \cdots\cdots (2\text{-}21)$$

$$E_{EG2} = E_{EGD} + E_{EGB} \times \eta_{EGB} \quad \cdots\cdots (2\text{-}22)$$

$$\eta_{EG} = E_{EG2} / E_{EG1} \quad \cdots\cdots (2\text{-}23)$$

ここで、E_{EG1}は発電電力量、E_{EG2}は利用可能な発電機エネルギ、E_{EGD}は発電電力量の直接利用分、E_{EGB}は発電電力量の電池経由分(以上、パターン運転の全時間にわたる積算量で、単位は全てkWh)、η_{EG}は発電機エネルギ有効利用率である。η_{EGB}はシリーズハイブリッドシステムで使用される場合の電池の平均的な充放電効率であり、充電損失が多い満充電領域を使用する純電気動力方式よりも高いと考えられるため、本章では 0.8（一定値）と仮定した。

一方、車両の消費電力量は、単純計算によれば要求電力量から回生電力量を差し引いた値となるはずであるが、回生電力量についても充放電損失が生じるため、実際に再利用可能な

電力量はそれを下回る。そこで、車両Ｂの一つのパターン運転にわたる消費電力量は次式により概算される。

$$E_E cons = E_E req - E_E reg \times \eta_{ERB} \quad \cdots\cdots (2\text{-}24)$$

ここで、$E_E cons$は電動機システムの消費電力量(kWh)、$E_E req$は電動機システムの要求電力量(kWh)、$E_E req$は回生電力量(kWh)である。ただしη_{ERB}は回生制動時の電池の充放電効率であり、η_{EGB}と同一とした。

また、運転中の消費電力量を電源別にみると次式の通りとなる。

$$E_E cons = E_{EGD} + E_{EGB} \times \eta_{EGB} + E_{ECB} = E_{EG2} + E_{ECB} \quad \cdots\cdots (2\text{-}25)$$

$$E_{ECB} = E_{EC} \times \eta_{ECB}$$

ここで、E_{ECB}は外部充電エネルギ(kWh)、E_{EC}は運転前の外部電源による充電時の充電装置一次側への入力電力量(kWh)である。またη_{ECB}は外部充電における充電装置と電池自体を含めた充電効率である。

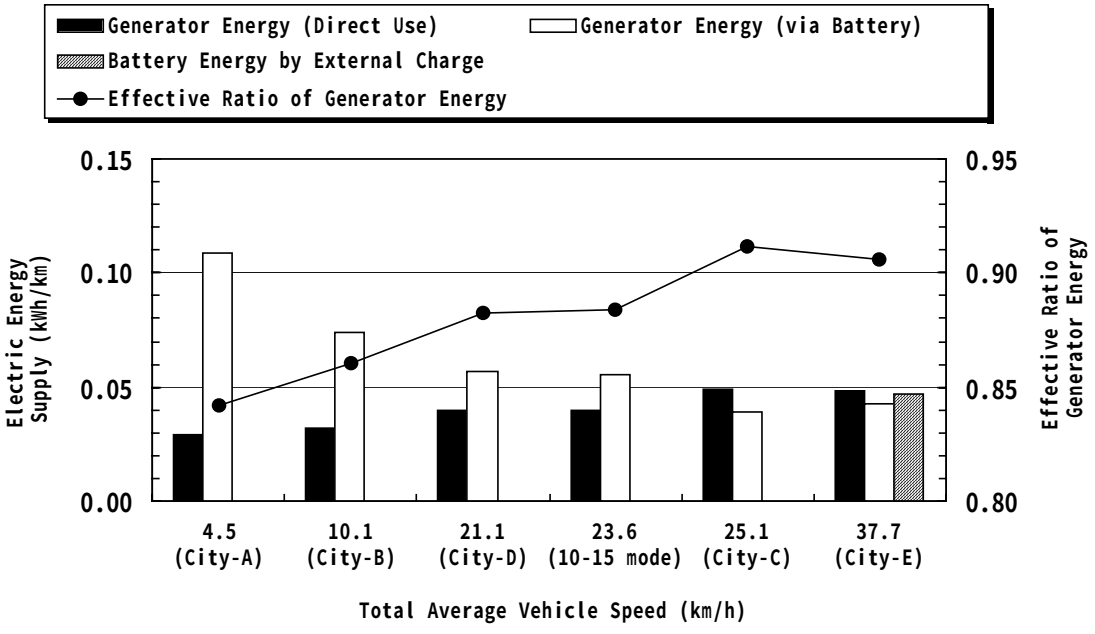


図 2.27　電気エネルギ供給源の内訳と発電機エネルギ有効係数

発電出力を 2.4kW として、このように定義した車両２の発電機の起動・停止を伴った運転における電気エネルギ源の内訳と、発電機エネルギ有効係数を、走行１km 当たりの平均値と

して図 2.27 に示す。この図においても、車速パターンの配列は図 2.26 と同様、平均車速（停車時間を含む全時間平均値）の順とした。全時間の平均車速が高いパターン、すなわち平均要求電力が大きいパターンほど消費電力量に占める発電機エネルギの直接使用分が多くなり、電池経由分が減少する。したがって City-A では発電機エネルギの多くが電池経由で使用されるため、有効係数は最低となる。一方、City-C や City-E のような車速が比較的高いパターンの場合は発電機エネルギの直接消費分が多くなり、有効係数は 0.9 以上という高い値を示す。City-E の運転では図 2.26 で示したように平均消費電力が発電機出力を上回るため、不足する電気エネルギは電池からの持ち出しとなり、パターン運転後の電池内部エネルギは運転前よりも減少する。しかし他のパターンでは、電池のエネルギ収支上は発電機エネルギだけで十分であるため、運転前後で電池内部エネルギが減少することはなく、電池は運転中の要求電力や回生電力の変動に伴う電気エネルギの一時的な蓄積と放出という役割に留まる。

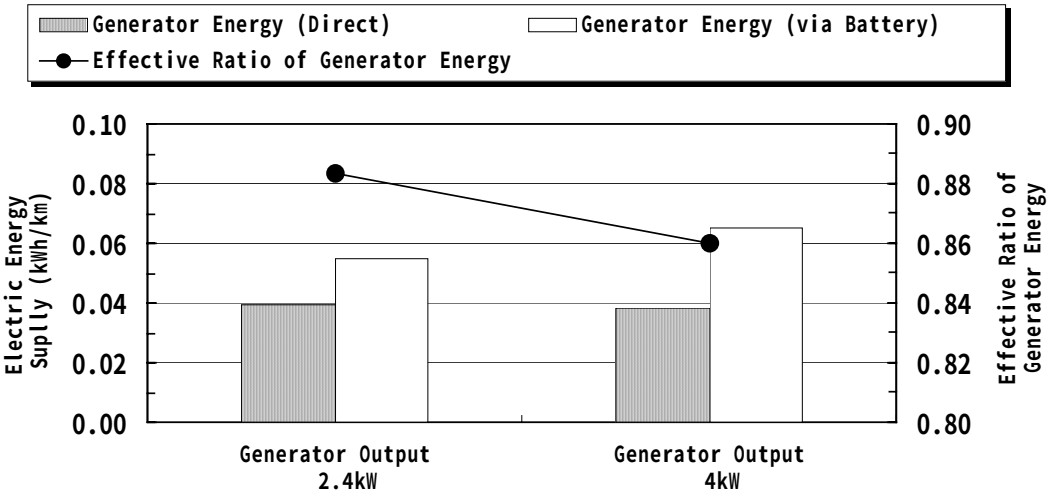


図 2.28　発電機出力の増大と直接消費割合の減少（車両２、10・15 モード）

発電出力を４kW として 10･15 モード運転を行った結果を、発電出力 2.4kW の場合と比較して図 2.28 に示す。この場合、前述のように City-E を含む全てのパターンが発電機エネルギのみで運転可能となり、運転の自由度が高まる。しかし発電出力が 2.4kW の場合に比べ、発電機エネルギの電池経由分が増加し直接消費分が減少して、有効係数は低下する。これらの結果から、発電出力が平均消費電力に対して過大となれば、発電機質量、ひいては車両質量が増加して走行仕事量が増大するだけでなく、発電機エネルギの電池経由分が増加して充放電損失が増大することとなる。したがって、シリーズハイブリッド動力システムの効率を高めるためには、車載発電機の出力は都市内走行に必要最小限の値とすることが望ましいと考

えられる。

図 2.29 は、回生制動時の回生電力との競合による発電機出力の低下を示す。回生制動作動時の発電出力は非作動時の出力（一定値として設定された定格出力値）に比べ、2.4kW発電機搭載の場合は約 15%、4kW発電機搭載の場合は約 10%低下し、全時間平均の発電出力も定格値を約４%下回る。これは、回生制動時は駆動電動機の起電力により電池端子電圧が急激に上昇して発電機出力電圧の上限を超え、発電機エネルギの電動機システムまたは電池への供給が阻止されるためであるが、このような発電出力の低下は発電機駆動機関の熱効率を悪化させると予想される。その防止策の一つとしては、電力回生制動の作動中は発電電力または回生電力をスーパーキャパシタ等の電池とは別の蓄電装置に導くことにより、発電電力と回生電力の競合によるシステム電圧の上昇を回避することが考えられる[14]。

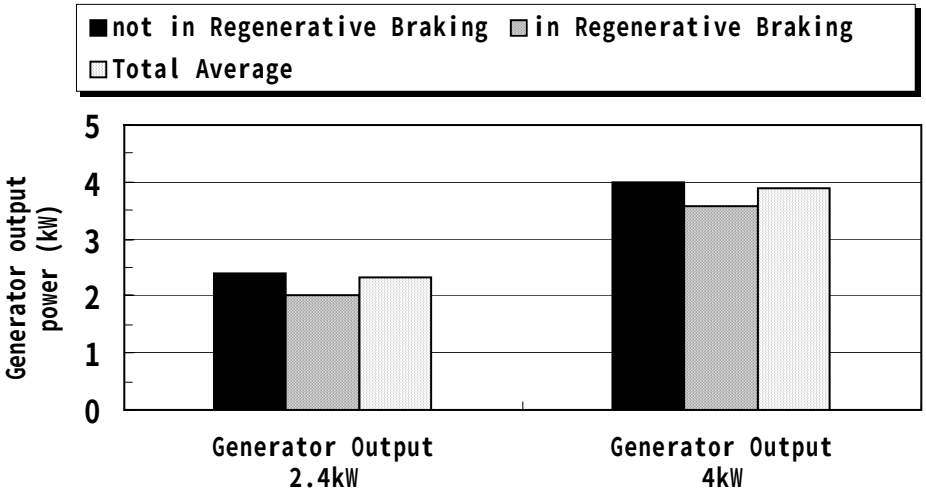


図 2.29　回生制動時の発電機出力低下

2.4.4　発電機エネルギ有効係数を考慮した航続距離と一次エネルギ消費量の推定

(1) 航続距離の推定　　本章のシリーズハイブリッド方式コミュータカーの航続距離は、次式により推定できる[15]。

$$L = (E_{EG2} + E_{ECB}) \div E_E cons_{/km} \qquad \cdots\cdots (2\text{-}26)$$

ただし、$E_E cons_{/km}$は、1km当たりの消費電力量(kWh/km)である。

10･15 モードおよびCity-Eを繰り返して運転する場合の、１補給（外部電源による充電および車載発電機機関用燃料の給油）当たりの航続距離を図 2.30 に示す。電源として、「外部充電エネルギのみ（純電気自動車として使用）」、「発電機エネルギのみ使用」および「外

部充電エネルギと発電機エネルギの併用」の３通りのケースを想定した。10･15 モード運転の場合、外部充電エネルギのみによる航続距離は 50㎞程度にすぎないが、発電機エネルギを使用すれば燃料の増量に伴って航続距離は飛躍的に増加する。例えば給油量を 10 ﾘｯﾀｰとすれば発電機エネルギだけで１補給当たり 300㎞程度の走行が可能であるが、これは都市内用途には十分な航続距離と考えられる。一方、City-Eを繰り返し運転する場合は電池の内部エネルギが次第に減少し、それが尽きた時点で走行不能となるため、１補給当たりの航続距離は搭載燃料をいくら増やしても 100㎞弱に留まる。したがって、定格出力 2.4㎾の発電出力でCity-Eを繰り返し運転する場合は、本実験のコミュータカーは外部充電依存型のシリーズハイブリッド車、いわゆるレンジエクステンダと位置づけられることとなる[16]。

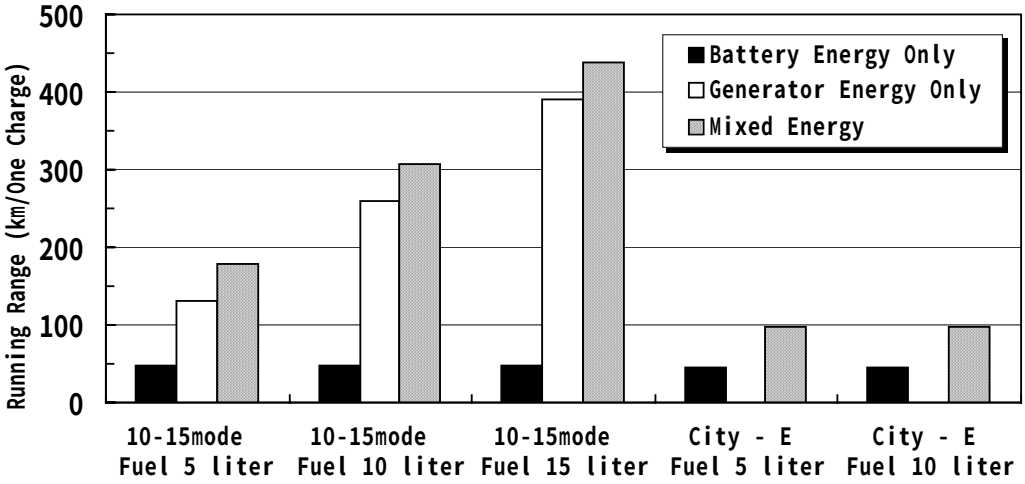


図 2.30　航続距離の比較（車両２、発電機出力：2.4kW）

(2) エネルギ効率と一次エネルギ消費量の推定　以上、シリーズハイブリッド動力システムを搭載したコミュータカーの車上における電気エネルギの流動、ならびに制動時のエネルギ回生について考察したが、それに基づいて従来型のガソリン機関駆動車両に対し、シリーズハイブリッド動力システムの採用による省エネルギ効果を評価するために、車両としてのエネルギ消費量の算定を試みた。

本実験の模擬シリーズハイブリッドシステムの各要素、およびそれらを乗算した、発電機関用燃料の化学エネルギから電動機システムの機械出力に至るまでの動力システムとしてのエネルギ効率を、一般的なガソリン機関駆動方式と比較した例を表 2.6 に示す。ここでは、ハイブリッドシステムの発電専用小型ディーゼル機関、発電体、および一般的な乗用車用ガソリン機関の効率を文献調査結果から仮定した[17]。また電力回生制動の効果は１を超える

係数として反映した。ハイブリッドシステムはエネルギ変換のいくつかの段階で損失が発生するものの、動力システムとしての総合効率は 0.23 となり、ガソリン機関駆動方式の約 1.5 倍の値を示す。これは内燃機関を発電専用とし定格出力で稼働させることによる熱効率の向上と、減速時の電力回生制動による省電力の効果が顕著にあらわれたたものと考えられる。

表 2.6　模擬ハイブリッドシステムの各要素のエネルギ効率（斜字は仮定値）

Item	Series Hybrid (Generator Energy Only)	Conventional (Eengine Drive)
Engine	*0.32*	*0.15*
On-board Generation	*0.90*	-
Generator Energy Factor	0.88	-
Motor System	0.78	-
(Regenerative Braking)	1.16	-
Total	0.23	*0.15*

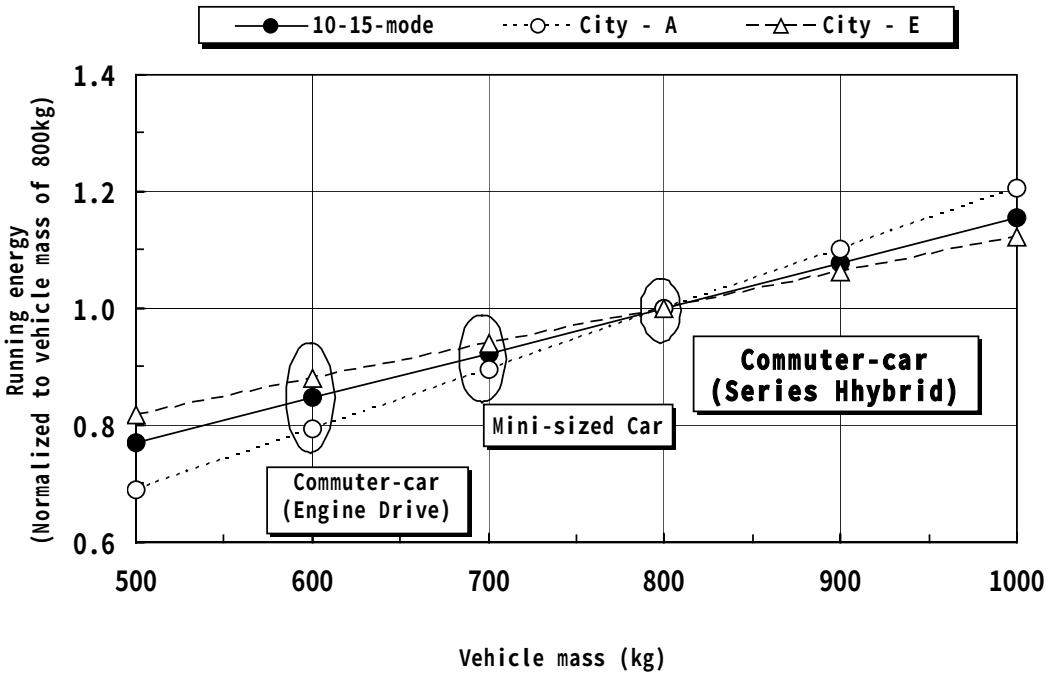


図 2.31　車両質量と走行仕事量（計算値）

一方、シリーズハイブリッド動力システムは内燃機関の他に発電体、電動機、電池等を有するため、これを搭載した車両は、同じ車格の内燃機関駆動車両よりも必然的に車両質量が増加する。それに伴って走行仕事量も増大するため、エネルギ消費に関して不利になること

も懸念される。コミュータカーおよび軽乗用車の加減速運転における、車両質量に対する走行仕事量の計算結果を図 2.31 に示す。走行仕事量は本実験で想定した表 2.2 の模擬コミュータカー（車両質量 800kg）を基準（＝１）とし、軽乗用車は市販車両の中で最も軽量のモデル（車両質量 700kg）を選定した[18]。本章で設定したコミュータカーを仮に一般的なガソリン機関駆動方式とすると、車両質量は 600kg程度に留まると考えられる。そのためガソリン機関駆動方式に代えて、本実験で設定したシリーズハイブリッド動力システムを採用することにより、車両の走行仕事量は 15～20%増加すると推定される。また最も軽量な軽乗用車の走行仕事量に比べても約 10%多い値である。

これらの検討結果を踏まえ、本実験で想定したシリーズハイブリッド方式コミュータカーの走行距離 1㎞当たりのエネルギ消費量を、精油所や発電所で使用される一次エネルギ(発熱量ベース)に換算した値とし、以下の①～③の手順によって試算した[11][17]。

① １回のパターン運転で消費される外部充電エネルギ (kWh)と発電機エネルギ (kWh)を車両各部の電力出入量から求める。

② 外部電池エネルギに関わる発電所段階の一次エネルギと、発電機エネルギに関わる使用燃料油の精油所段階の一次エネルギ消費量をそれぞれ次式により求める。

i) 外部充電エネルギについて

$$E_{PE}cons = E_{ECB} \div (\eta_{ECB} \times \eta_{ETR} \times \eta_{EP}) \quad \cdots\cdots (2\text{-}27)$$

ここで、$E_{PE}cons$はパターン運転にわたる車両の発電所換算の一次エネルギ消費量(kWh)、E_{ECB}は電動機システムが運転中に消費した車載電池の外部充電エネルギ(kWh)である。ただし、η_{ECB}は外部電源により車載電池を充電する場合の充電器と電池を含んだ充放電効率、η_{ETR}は送変電効率、η_{EP}は発電所の発電効率である。

ii)発電機エネルギについて

$$E_{PR}cons = E_{EG2} \div (\eta_{EG} \times \eta_{EG} \times \eta_{TR} \times \eta_{RF}) \quad \cdots\cdots (2\text{-}28)$$

ここで、$E_{PR}cons$はパターン運転にわたる車両の精油所換算の一次エネルギ消費量(kWh)、E_{EG2}は電動機システムが運転中に消費した発電機エネルギ(kWh)である。ただし、η_{EG}は前述した発電機エネルギ有効係数、η_{EG}は車載発電機の発電効率、η_{TR}は燃料油の配送効率、η_{RF}は精油所の精製効率である。

③ 次式により、上記②の式 2-27 および式 2-28 で求めた、発電所換算の一次エネルギ消費量

と精油所換算の一次エネルギ消費量の和をパターン運転の走行距離で除し、車両の走行 1㎞当たりの一次エネルギ消費量を算出する。

$E_P cons = (E_{PE} cons + E_{PR} cons) \div L$ ・・・・・(2-29)

ここで、$E_P cons$は車両の走行 1㎞当たりの精油所および発電所換算の一次エネルギ消費量(kWh/㎞)である。ただし、Lは走行距離(㎞)である。

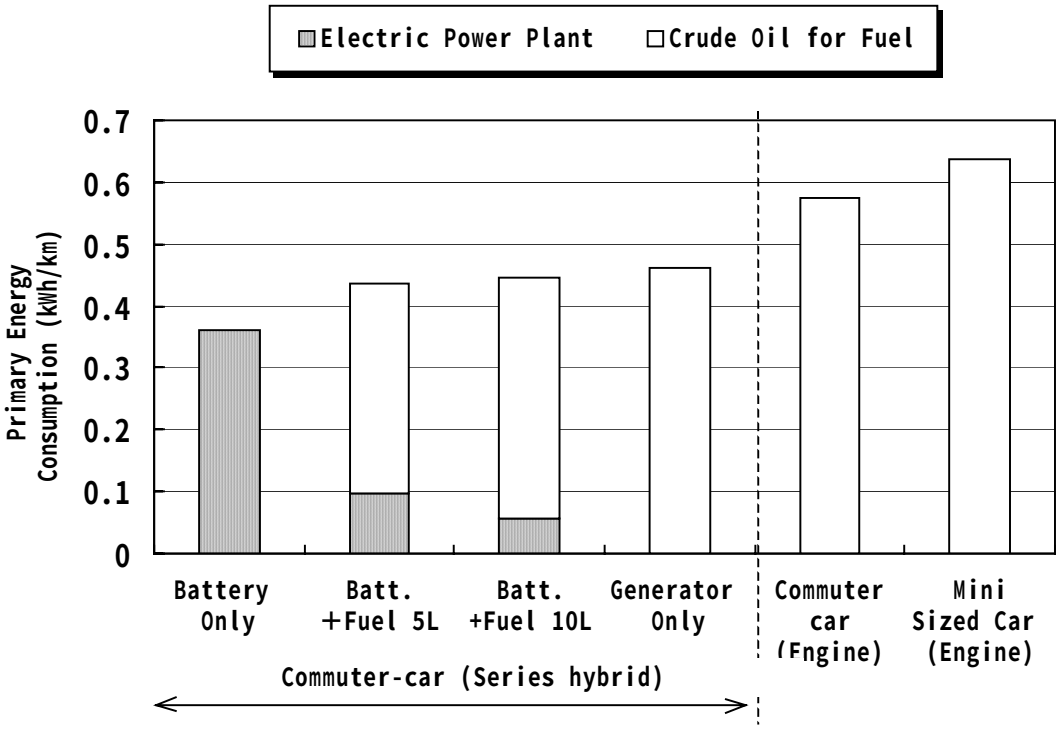


図 2.32　シリーズハイブリッド車両とガソリン機関駆動車両の一次エネルギ消費量

図 2.32 はその結果を示す。車上エネルギの使用パターンを５通りに設定したが、いずれの場合も模擬コミューターカー（車両Ｂ）の一次エネルギ消費量は、同一車体のガソリン機関駆動のコミュータカーより 20%程度、また軽乗用車（軽量モデル）を 30%程度下回る値である。これは、シリーズハイブリッド動力システムを採用することにより、車両質量・走行仕事量は増大しながらも、発電用内燃機関の熱効率向上や制動時の電力回生が寄与して、大幅な省エネルギに繋がったものと判断できる。また外部充電エネルギを多用するほど一次エネルギの消費量は減少する傾向が見られる。外部充電エネルギの源である発電所は一次エネルギとして原油等の化石燃料だけでなく原子力、水力も利用するため、地球温暖化物質である二酸化炭素排出量はさらに削減されることとなる。航続距離の点では図 2.30 に示すように発

電機エネルギだけでも十分であるが、一次エネルギ消費量削減、さらに地球温暖化防止の観点からは、外部電源による充電エネルギを積極的に併用することが望ましいと考えられる。

2.5. 結　言

本章では、乗用車の通勤モニタ走行から得た車速データを解析することにより、都市内運転の走行実態を調べ、コミュータカーが具備すべき性能要件を考察した。その結果からシリーズハイブリッド方式の適用を考え、２種類の模擬的なコミュータカーを台上実験装置上に設定し、都市内パターンに従った台上運転を行って、都市内走行に必要な性能と省エネルギ性を両立する駆動機構の仕様や、車載発電機による給電の最適化について検討した。また、コミュータカーの航続距離やエネルギ消費量について評価した。それらによって、以下の結果が得られた。

(1) モニタ走行データから、都市内運転における１日当たりの走行距離は概ね 50㎞ 以下で、全運転時間の 20～30%は停車時間であり、また発進加速の頻度は 10・15 モードの 1.2～1.8 倍で、走行仕事量は車速の平均値よりも車速の変動との相関性が強い、等の実態を把握した。

(2) 「低出力直流電動機(20㎾)と手動変速機」および「高出力交流電動機(40㎾)と固定減速機」という二種類の模擬車両（車両質量各 800kg)を設定して基本的な加減速運転を行った。その結果、後者は前者より発進加速能力、および要求電力量、回生電力量の点で格段に有利であることを明らかにした。

(3) 高出力電動機に４通りの固定減速比を組み合わせて発進加速能力を推定した。また電動機の運転領域から加減速走行時の機械－電気エネルギ変換効率を算定し（渋滞パターンで約 40%、他のパターンで 70～80%）、適切な減速比を選定した。

(4) 車載発電機エネルギの直接消費分と電池経由分を定量化し、後者で生じる充放電損失分を反映した発電機エネルギ有効利用率を概算した。発電出力が 10・15 モード運転の平均電力と同程度の場合、各種パターン運転時の有効利用率は概ね 0.85～0.9 であり、有効利用率を高めるためには、発電出力を運転継続に必要な最小限の値とすべきことを示した。

(5) 初期充電エネルギと発電燃料の使用パターンを複数設定して、本実験のコミュータカーの航続距離を試算した。それにより、最小限の発電出力による 10・15 モード運転では 10 リットル程度の燃料搭載で 200㎞ 以上の航続距離が得られるが、車速が高く大電力を要するパターン運転では 100㎞ 程度に留まると推定した。

(6) 本実験のハイブリッド動力システムのエネルギ効率を算定し、既存のガソリン機関駆動方式の約 1.5 倍に達すると評価した。さらに、それを搭載したコミュータカーの一次エネル

ギ消費量を試算した結果、車両質量は増加気味ながら、現行の軽乗用車よりも約30%低減される。また外部充電エネルギを積極的に利用すれば一次エネルギ消費量はさらに低減され、地球温暖化防止にも寄与するものと推定した。

第２章の参考文献

(1) 齋藤、「”産・官・学”共同プロジェクトの成果」、カースタイリング別冊ＮＣＶ21－21世紀は超小型車の時代、P.5、三栄書房　(2000)

(2) 太田、「超小型車の開発と利用システムに期待する」、カースタイリング別冊ＮＣＶ21－21世紀は超小型車の時代、P.8、三栄書房　(2000)

(3) 宇貫　他、「シティコミュータのコンセプト」、1993年自動車技術会学術講演会前刷集934、P.153-156 (1993)

(4) 成澤　他、「次世代都市用超小型自動車の研究開発」、1999年自動車技術会学術講演会前刷集No.77-74、P.1-4 (1999)

(5) 運輸省次世代都市用超小型自動車研究検討会広報資料、「次世代都市用超小型自動車の技術開発指針について」（2000）

(6) 岩崎通信機(株)、「プログラマブルデータ・ロガーSC-8505取扱説明書」、P.49-50 (1993)

(7) 小高　他、「自動車の排出ガス測定用走行モード構成手法の研究（第１報）」、第16回交通安全公害研究所研究発表会講演概要、P.58-61（1986）

(8) 神鋼電機（株）、「電磁クラッチ／ブレーキ総合カタログ」、P.292　(1998)

(9) 清水　他、「環境調和型技術としての電気自動車の評価に関する基礎的研究」、国立公害研究所報告　第103号、P.66 (1987)

(10)（株）小野測器、「ＣＲＴドライバーズエード取扱説明書」　(1997)

(11) 清水、「電気自動車のすべて（第２版）」、日刊工業新聞社、P.29-32　(1992)

(12) 堀、「電気自動車用モータ・コントローラの最新技術」、自動車技術会NO.9405シンポジウム「最新の電気自動車技術」テキスト、P.17　(1994)

(13) 古賀、「電気自動車の減速比設定に関する一考察」、自動車技術Vol.49 NO.10、 P.84 (1995)

(14) 小松　他、「大容量コンデンサバッテリの開発」、自動車技術会1996年春季大会学術講演会前刷集 No.961、P.163-166 (1996)

(15) M.Hayashida et.al 、“Study on Series Hybrid Electric Commuter-car Concept”、 SAE

Paper 970197 (1997)
(16) 清水、「ハイブリッド制御技術の変遷と最新技術動向」、自動車技術 Vol.56 No.9、P.70-75 (2002)
(17) 岩井、「高効率クリーンエネルギ自動車」の開発と将来展望、 自動車研究第 19 巻第６号 P.169 (1997)
(18) 自動車ガイドブック Vol.50、日本自動車工業会 (2003)